Paweł Lindstedt
Tomasz Sudakowski
Rafał Grądzki

EKSPLOATACYJNA NIEZAWODNOŚĆ MASZYNY I JEJ TEORETYCZNE PODSTAWY

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

OPINIODAWCY
prof. dr hab. inż. Maciej Woropay
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa
prof. dr hab. inż. Józef Żurek
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

REDAKTOR WYDANIA
mgr inż. Krzysztof BUBRZYK

ADIUSTACJA I KOREKTA
mgr Magdalena MALCZEWSKA

ŁAMANIE TEKSTU
Elżbieta MAKSYMOWICZ

© Copyright by Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych
Warszawa 2016

ISBN 978-83-61021-93-3

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH
01-494 Warszawa 46, skr. poczt. 96, ul. Księcia Bolesława 6

Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

SPIS TREŚCI

Przedmowa 7

Wstęp 9

1. Cybernetyczny system eksploatacji obiektów technicznych 11

1.1. Elementy cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego 11

1.2. Diagnostyka w cybernetycznym systemie eksploatacji obiektów i jej związki z niezawodnością 15
1.2.1. Ogólna charakterystyka diagnostyki w systemie eksploatacji 15
1.2.2. Szczegółowe wytyczne realizacji działań diagnostycznych 19
1.2.2.1. Terminy i definicje 19
1.2.2.2. Wytyczne dotyczące systemu diagnostycznego 21
1.2.2.3. Podstawowe elementy systemu diagnostycznego 23
1.2.2.4. Środki do realizacji procesu diagnozowania 25
1.2.2.5. Środki do badań nieniszczących 30
1.2.2.6. Wytyczne dotyczące dokumentacji systemu diagnostycznego 31
1.2.3. Szczegółowe wytyczne dotyczące systemów diagnostycznych płatowca 32
1.2.3.1. Wymagania podstawowe 32
1.2.3.2. Podatność diagnostyczna płatowca 33
1.2.3.3. Kontrola i badania diagnostyczne płatowca 34
1.2.4. Szczegółowe wymagania dotyczące systemów diagnostycznych lotniczych silników turbinowych 35
1.2.4.1. Wymagania podstawowe 35
1.2.4.2. Podatność diagnostyczna lotniczych silników turbinowych 35
1.2.4.3. Wymagania dotyczące badania diagnostycznego silnika 37

1.3. Regulacja w systemie eksploatacji obiektów i jej związki z niezawodnością 39
1.3.1. Ogólna charakterystyka regulacji w systemie eksploatacji 39

1.3.2. Szczegółowe wytyczne realizacji działań regulacji silnika lotniczego 41
1.3.2.1. Terminy i definicje 41
1.3.2.2. Opis układu regulacji silnika lotniczego wynikający z podstaw / zasad automatyki 43
1.3.2.3. Podstawowe elementy składowe układu regulacji silnika lotniczego 44
1.3.2.4. Środki do realizacji technik (działań) regulacyjnych silnika lotniczego 46
1.3.2.5. Elektroniczne wspomaganie procesu regulacji silnika lotniczego 49
1.3.3. Klasyfikowanie regulatorów silników lotniczych 50
1.4. Niezawodność w systemie eksploatacji obiektów 51
1.5. Podsumowanie 52
1.6. Spis literatury 52
2. Uszkodzenia jako baza charakterystyk niezawodnościowych 55
2.1. Rodzaje uszkodzeń 55
2.2. Identyfikacja uszkodzeń metodami bezpośrednimi (organoleptycznymi) 58
2.3. Identyfikacja uszkodzeń parametrycznych i chwilowych z równań interakcji 59
2.4. Sposób wyznaczania liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych 63
2.4.1. Wyznaczanie liczby uszkodzeń z wykorzystaniem statystycznych progów diagnostycznych dla parametrów stanu działania i stanu technicznego 63
2.4.2. Wyznaczanie liczby uszkodzeń z wykorzystaniem progów diagnostycznych wynikających z twierdzenia Lindeberg'a – Levy'ego 66
2.5. Przykład identyfikacji uszkodzeń zespołów pompowych podczas ich eksploatacji 67
2.5.1. Funkcjonalna metoda diagnozowania układu łożyskowania 68
2.5.2. Wibroakustyczna metoda diagnozowania układu łożyskowania 69
2.5.3. Kompleksowa metoda diagnozowania układu łożyskowania 71
2.5.4. Badania eksploatacyjne układu łożyskowania zespołów pompowych 72

2.6. Podsumowanie 101
2.7. Spis literatury 102
3. Niezawodność w technice 105
3.1. Charakterystyki niezawodnościowe obiektu 105
3.2. Ocena niezawodności układów w procesie eksploatacji 130
3.3. Ocena zgodności rozkładu z danymi doświadczalnymi 135
3.3.1. Wzrokowy test zgodności 135
3.3.2. Weryfikacja rozkładów prawdopodobieństwa metodą graficzną 136
3.4. Podsumowanie 144
3.5. Spis literatury 145
4. Predykcja parametrów niezawodnościowych jednostkowego obiektu w procesie eksploatacji 147
4.1. Wybór kodu układu łożyskowania zespołu pompowego 147
4.2. Zasada przetwarzania danych eksploatacyjnych (liczba uszkodzeń, liczność zbioru, czas powstania uszkodzeń) na parametry niezawodności 148
4.3. Parametry niezawodności łożysk zespołów pompowych i ich przykładowa interpretacja 149
4.4. Podsumowanie 159
4.5. Spis literatury 160
Podsumowanie monografii 163
Indeks 167

PRZEDMOWA

We współczesnym świecie istnieje bardzo duża liczba wzajemnie uwarunkowanych obiektów technicznych (ich zespołów i elementów) oraz obiektów biologicznych (ich organów i części). Ten stan rzeczy wymaga od ludzi, a szczególnie od służb specjalizujących się w użytkowaniu i obsłudze obiektów technicznych, optymalnego działania szczególnie w zakresie ich regulowania, diagnozowania oraz badania bezpieczeństwa i niezawodności.

Dotychczasowe obserwacje tych współzależnych działań, pozwoliły sformułować następujące, płynące bezpośrednio z praktyki podstawowe wymagania, które są, jak się okazuje, bezwzględnie konieczne do syntetycznej i jednoznacznej oceny stanu zdatności każdego rozpatrywanego obiektu technicznego (także biologicznego):

- obiekt musi być wyregulowany (zgodnie z zasadami automatyki),
- obiekt musi być zdiagnozowany (zgodnie z zasadami diagnostyki),
- obiekt musi być bezpieczny i niezawodny (własności te określane są zgodnie z teorią niezawodności i bezpieczeństwa).

Bieżąca praktyka eksploatacyjna ciągle potwierdza, że regulacja, diagnostyka i niezawodność obiektu rozpatrywane są oddzielnie i że działania z danego zakresu podejmowane są autonomicznie. Jest to trudny do zaakceptowania stan rzeczy. Zapewne wynika to z dużych różnic w teorii i praktyce podstaw automatyki, zasad diagnostyki i teorii niezawodności. Potrzeba koordynacji tych działań jest oczywista. Potwierdza to często w praktyce spotykany ciąg zdarzeń: potrzeba wykonania regulacji (automatyka) ma swoją przyczynę w zmianie stanu technicznego (diagnostyka), który to w granicznych przypadkach identyfikowany jest jako uszkodzenie obiektu (niezawodność).

Okazuje się, że przesłanką do koordynacji obsługowych działań w zakresie regulacji, diagnostyki i niezawodności może być fakt, że w procesie eksploatacji obiektu realnie istnieje tylko jedna mierzalna i dostępna informacja o tym obiekcie, oraz to, że może ona być wielokrotnie

wykorzystana, różnie przetworzona zgodnie z różnymi potrzebami wynikającymi z jego aktualnego stanu zdatności. Może ona zatem być wykorzystana do oceny: stanu regulacji obiektu (według zasad automatyki), stanu technicznego obiektu (według zasad diagnostyki) i stanu niezawodności obiektu (według teorii niezawodności).

Stąd wynika konkluzja, że w procesie obsługi obiektów technicznych coraz większego znaczenia nabiera pełna koordynacja działalności regulacyjnej, diagnostycznej i niezawodnościowej w celu zapewnienia im odpowiedniego bezpieczeństwa podczas ich użytkowania. Można spodziewać się, że rezultatem tego racjonalnego działania będzie optymalny system eksploatacji obiektów według stanu technicznego (tani, skuteczny, efektywny), gwarantujący prawidłowe wyregulowanie, właściwy stan techniczny oraz wymagany stan niezawodności.

Monografia powstała w wyniku realizowanych przez autorów długoletnich badań różnych obiektów technicznych w wielu okresach obserwacji. Badano: układy łożyskowania zespołu pompowego (dwa układy i dwa okresy obserwacji), układy łożyskowania silnika Allison-250 (dwa układy), autobusy komunikacji miejskiej (trzy autobusy i trzy okresy obserwacji – badania są kontynuowane). Wyniki tych badań były fragmentarycznie publikowane w czasopismach naukowych i zagranicznych: Journal of KONBiN, Journal of KONES, Eksploatacja i Niezawodność Maintenance and Reliability, Solid State Phenomena, Journal of Vibroengineering i in. Były też prezentowane na konferencjach krajowych i zagranicznych.

Pragniemy wyrazić głęboką wdzięczność Recenzentom monografii: prof. dr. hab. inż. Maciejowi Woropayowi i prof. dr. hab. inż. Józefowi Żurkowi za cenne i konstruktywne uwagi. Pozwoliły one mocniej zaakcentować potrzebę jednoczesnej oceny stanu regulacji, diagnostyki i niezawodności każdego egzemplarza maszyny w każdej chwili jej obsługi. Dodatkowo uwypuklono własność ergodyczności strumienia uszkodzeń pozwalającą powiązać czas obserwacji jednego obiektu z licznością całego zbioru obiektów.

Autorzy

WSTĘP

Wprowadzenie nowych strategii eksploatacji obiektów technicznych (wg stanu technicznego, stanu niezawodności) wymaga ciągłego doskonalenia i rozwoju technik regulacji, diagnostyki i oceny niezawodności, od których w dużej mierze zależy ich trwałość, bezpieczeństwo, efektywność, skuteczność oraz ekonomia użytkowania i obsługi.

Prawidłowa ocena niezawodności obiektów, układów technicznych (maszyn, silników, instalacji hydraulicznych itp.) jest jednym z podstawowych warunków determinujących dopuszczenie ich do użytkowania. Krótko i dobitnie mówi się, że każdy obiekt (maszyna) musi być niezawodny. Proces oceny niezawodności maszyny przeprowadza się zgodnie z teorią niezawodności i zgodnie z obowiązującymi Polskimi Normami. Operacja ta musi być realizowana podczas szeroko rozumianej obsługi technicznej maszyny. Zatem można stwierdzić, że ocena niezawodności powinna być jednym z podstawowych elementów obsługi technicznej, stąd i eksploatacji obiektów (maszyn). Jej skuteczność, jak pokazuje praktyka, w dużej mierze zależy od postawy PRODUCENTA w stosunku do UŻYTKOWNIKA i OBSŁUGI TECHNICZNEJ.

System oceny niezawodności obiektu jest planowany i proponowany już w fazie projektowania każdego obiektu. Na etapie projektowania obiektu określane są metody identyfikacji uszkodzeń, progi graniczne dla parametrów, sygnałów, wskaźników stanu działania i ich stanu technicznego. PROJEKTANCI i PRODUCENCI posiadają dużą wiedzę, która wraz z obiektem powinna być przekazana do systemu jego eksploatacji.

Między systemem produkcji a systemem eksploatacji istnieje wspólnota celów, polegająca na ustawicznym zapewnieniu wysokiej jakości działania i sprawności obiektu, a także dużej trwałości, żywotności i niezawodności. Stąd szczególnej wagi nabierają powiązania między systemami produkcji i eksploatacji. Związki między tymi dwoma autonomicznymi systemami określa między innymi jakość wzajemnej komunikacji. Ważnym elementem tej komunikacji jest prawidłowe przekazanie wyprodukowanego obiektu z systemu produkcji do systemu eksploatacji (użyt-

kowania i obsługi). Obiekt przekazuje się z pełnym jego opisem, instrukcjami kontroli działania obiektu, lokalizacji uszkodzeń i oceny, genezy i prognozy stanu technicznego. Producent zapewnia też stałe przedstawicielstwo do merytorycznego nadzoru nad obsługą i użytkowaniem obiektu technicznego. Przekazuje z obiektem odpowiedni sprzęt specjalny, wyposażenie do przeprowadzenia prób kontrolnych podczas obsługi obiektu.

Celem pracy jest przedstawienie podstawowej wiedzy potrzebnej do praktycznej oceny niezawodności maszyny w procesie eksploatacji z uwzględnieniem problemów z diagnostyki i regulacji w kontekście identyfikacji uszkodzeń.

Wiedza zawarta w tej monografii ma umożliwić rozwiazywanie problemów niezawodnościowych podczas praktycznej obsługi obiektów na ich abstrakcyjnych modelach wyznaczonych podczas badań eksperymentalnych, których analiza pozwoli zoptymalizować szeroko rozumiane działania obsługowe w procesie eksploatacji maszyn.

1

CYBERNETYCZNY SYSTEM EKSPLOATACJI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Złożone i często kosztowne obiekty techniczne składają się z wielu różnych elementów, które powinny spełniać wysokie wymagania materiałowe i technologiczne oraz trwałościowe i niezawodnościowe. Pracują w zmiennym i uciążliwym otoczeniu, co wynika z trudnych i skomplikowanych, często wygórowanych wymagań programu ich użytkowania. Obiekty techniczne (szczególnie te, których resurs wynosi kilkadziesiąt tysięcy godzin i więcej) wymagają specjalnej dbałości obsługowej w zakresie ich regulacji oraz diagnostyki dla zapewnienia im odpowiednich charakterystyk niezawodności i bezpieczeństwa. Obsługę powinna cechować duża sumienność i dokładność wykonania zalecanych czynności oraz to, że znaczna część elementów składowych jest obsługiwana zgodnie z zasadami diagnostyki według stanu technicznego. Obsługa techniczna staje zatem przed ogromnymi i skomplikowanymi problemami utrzymywania i prognozowania zdatności obiektów, które bez odpowiedniego naukowego interdyscyplinarnego wspomagania w zakresie regulacji, diagnostyki i niezawodności nie będą mogły być skutecznie rozwiązane [4, 5, 6, 9, 11, 12, 14, 22].

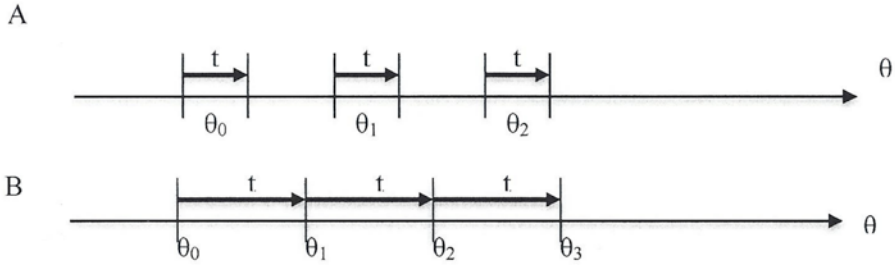
1.1. Elementy cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego

Maszyny (obiekty techniczne) podlegają takim samym procesom destrukcyjnym jak organizmy żywe (obiekty biologiczne) i cała przyroda. Maszyna nowa starzeje się i przez to przemienia się w maszynę starą (we

wrak maszyny), podobnie jak dziecko przeistacza się w osobnika dorosłego, w końcu starego (wrak człowieka), czy roślina młoda w wielowiekowe drzewo [8, 13].

Proces ten jest nieuchronny i nieodwracalny, a obiekty techniczne, biologiczne i przyrodnicze na jego bieg nie mają żadnego wpływu. Realizuje się on bowiem w przestrzeni czasu nieodwracalnego, inaczej czasu ewolucji, jeszcze inaczej czasu bergsonowskiego θ. Może on przyjmować różne wartości $0<\theta<\infty$, przy czym obowiązuje dodatkowo zasada, że zawsze $\theta_0<\theta_1<\theta_2$ ... Dlatego na drodze biegu czasu θ jest czas teraźniejszy (np. θ_1), czas przeszły (θ_0) i przyszły (np. θ_2). Zatem może on być wykorzystany do opisu relacji między przeszłością, teraźniejszością i przyszłością stanu energetycznego, materiałowego i informatycznego wielkich systemów technicznych, ekonomicznych i przyrodniczych.

Zakłada się, że istnieją dostatecznie krótkie chwile $\Delta\theta$, w których czas bergsonowski praktycznie „stoi" w miejscu. Tym niemniej w tych chwilach (które nie mają żadnego znaczenia dla biegu czasu bergsonowskiego θ) mogą być wykonane istotne prace związane z ustaleniem aktualnego stanu działania i aktualnego stanu technicznego. Chwile te tworzą przestrzeń czasu odwracalnego, newtonowskiego t. W czasie tym wykonywane są różne badania prowadzące do identyfikacji obiektu. Ostatecznie stwierdza się, że proces badań obiektu, systemu, realizowany w przestrzeni czasu t (czyli odwracalnego, newtonowskiego czasu badań, identyfikacji), może być programowany lub planowany w zależności od potrzeb. Może on być wydłużany i skracany. Może być odwrócony od wartości końcowej (koniec badań) do wartości początkowej (ponownie do początku badań). Badając relację między t i θ, można stwierdzić oczywisty fakt, że czas newtonowski nakłada się na czas bergsonowski (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Czas bergsonowski θ i newtonowski t.
A – sekwencyjny sposób badania obiektu technicznego,
B – ciągły sposób badania obiektu technicznego

Analizując przypadek A (rys. 1.1) relacji między czasem t i θ, stwierdza się, że dla np. θ_0, θ_1, θ_2 krótki czas eksperymentu t jest czasem autonomicznym szczególnie w zakresie badań, które mogą być powtarzane wielokrotnie, a przez to czas t jest odwracalny. Przykładem takich badań mogą być badania produktów zużywania w oleju smarującym układów tribologicznych (próbka oleju może być wielokrotnie pobierana i badana).

Analizując przypadek B (rys. 1.1) relacji między t i θ, stwierdza się, że czas t w okresach $\theta_0 \div \theta_1$, $\theta_1 \div \theta_2$ itp. w pełni pokrywa się z czasem θ. Ponieważ czas t w 100% wypełnia czas θ, zatem można by błędnie uznać, że czasy t i θ są tożsame. Rozszerzenie czasu t na cały okres czasu np. $\theta_0 \div \theta_1$ nie oznacza, że ma on cechy czasu θ. Taki wniosek jest całkowicie nieuprawniony, bowiem w czasie t nie może być rozpatrywana przeszłość, teraźniejszość i przyszłość. Dodatkowo to, co dzieje się w czasie t, może być odwrócone, poprawione, anulowane (np. wyniki z obserwacji obiektu w czasie $\theta_0 \div \theta_1$ mogą nie być brane pod uwagę – uznane za niebyłe), chociaż czas θ nieodwracalnie przebył drogę od chwili θ_0 do θ_1. Przykładem takich badań mogą być ciągłe badania sygnału wibroakustycznego (np. sygnał w czasie $\theta_0 \div \theta_1$ może być różnie analizowany, a nawet anulowany). Czasy bergsonowski θ i newtonowski t wykorzystywane są do opisu procesów zachodzących w systemach eksploatacji [8, 11, 12, 24].

Schemat modelu cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego przedstawiono na rys. 1.2, z którego wynika, że podczas użytkowania i przechowywania obiektu następuje jego ciągła i nieuchronna destrukcja (zmiany regulacji, zużycie, zwiększenie zawodności), a jego odpowiednie działanie jest możliwe przy odpowiednim zasilaniu energetycznym, materiałowym i informacyjnym. Dostrzega się też, że istniejące zjawisko destrukcji decyduje o kształcie systemu utrzymywania jego zdatności (obsługi) oraz gwarantuje wymaganą relację między jego częścią materiałową, energetyczną i informacyjną.

System obsługi powinien składać się z podsystemów regulacji, diagnostyki i niezawodności.

Celem regulacji jest utrzymywanie optymalnej jakości działania obiektu technicznego zgodnie z informacją wynikającą z zasad automatyki. Prowadzi się ją zawsze w czasie newtonowskim, czyli dynamicznym – t. Miarą stanu regulacji są relacje między sygnałami wyrażone wskaźnikami jakości regulacji.

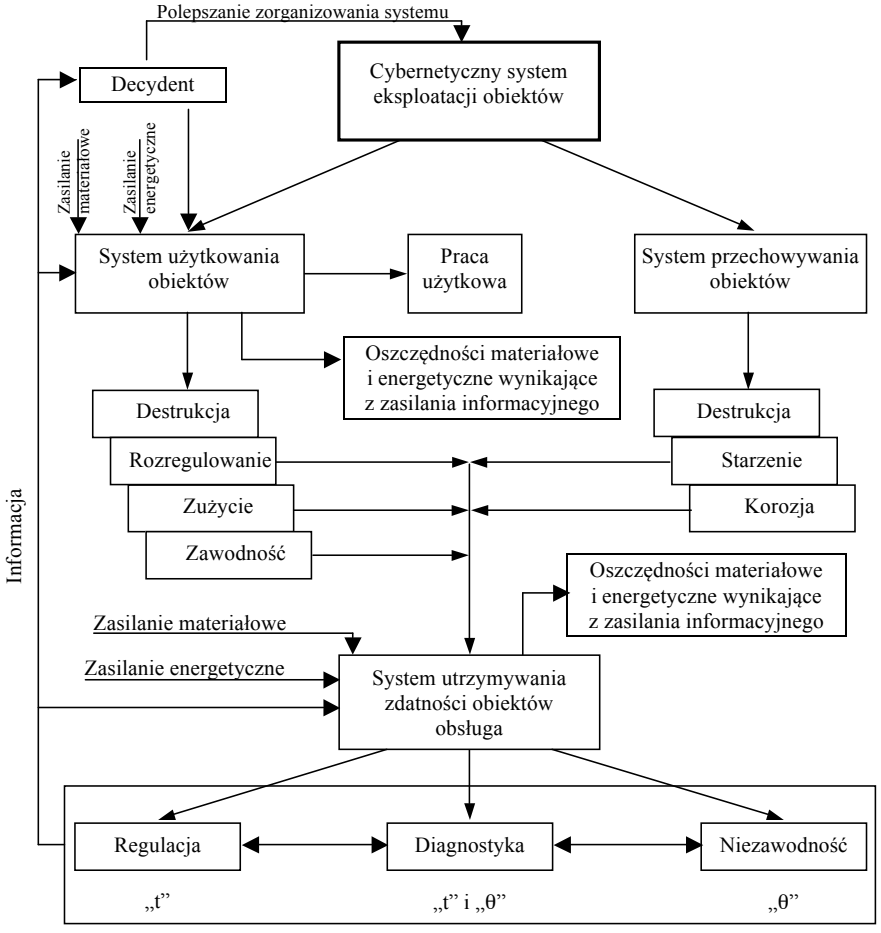
Celem diagnostyki jest pozyskiwanie informacji o zmianach stanu technicznego zachodzących podczas eksploatacji obiektu metodami pośrednimi, bez konieczności jego demontażu, wykorzystując mierzone sygnały diagnostyczne obiektu i sygnały otoczenia. W systemach diagnostycznych wyróżnia się działalność obsługową, którą prowadzi się w czasie dynamicznym t (identyfikacja obiektu) i działalność obsługową, prowadzoną w czasie eksploatacyjnym θ. Wiedza (informacja) o zmianach stanu technicznego stwarza podstawy do optymalnej (bezpiecznej i taniej) eksploatacji obiektów według stanu technicznego.

Celem badania niezawodności jest ciągłe uściślanie charakterystyk niezawodności na podstawie wiedzy o zaistniałych uszkodzeniach (katastroficznych, parametrycznych i przemijających) podczas eksploatacji obiektu. Obecnie coraz częściej stosowane są metody określania charakterystyk niezawodnościowych na podstawie uszkodzeń parametrycznych i chwilowych przed wystąpieniem zawsze niebezpiecznych, katastrofalnych w skutkach uszkodzeń katastroficznych. Charakterystyki niezawodnościowe opisywane są w czasie eksploatacyjnym θ.

Informacja o stanie regulacji, stanie technicznym i stanie niezawodnościowym (rys. 1.2) przekazywana jest personelowi obsługi technicznej obiektu (w celu poprawienia jakości czynności obsługowych), użytkownikowi (w celu dostosowania warunków użytkowania do możliwości technicznych obiektu) oraz decydentowi (w celu ciągłego podnoszenia stanu zorganizowania systemu) i ostatecznie zamieniona (zgodnie ze wzorem Maxwella: $\Delta E=10^{-16}\Delta I\left[\frac{erg}{K}\right]$ wiążącym przyrost energii ΔE z przyrostem informacji ΔI) na oszczędności czasu, materiałowe i energetyczne [8, 12, 18, 24].

Zgodnie z zasadami cybernetyki w procesie obsługi obiektów technicznych, obserwowane i dokumentowane są zmiany zaistniałe w ich regulacji, diagnostyce i niezawodności. Zmiany te opisywane są w czasie eksploatacyjnym θ i są podstawą do planowania odpowiednio dopasowanej zmiany obsługi i użytkowania obiektu.

Szczególną rolę w systemie utrzymywania zdatności obiektu odgrywa diagnostyka poprzez jej bezpośrednie powiązanie z systemami regulacji i niezawodności.



Rys. 1.2. Struktura cybernetycznego systemu eksploatacji obiektów: t – czas dynamiczny (newtonowski), θ – czas eksploatacyjny (bergsonowski) [11]

1.2. Diagnostyka w cybernetycznym systemie eksploatacji obiektów i jej związki z niezawodnością

1.2.1. Ogólna charakterystyka diagnostyki w systemie eksploatacji

Schemat systemu diagnostyki obiektu technicznego i jego powiązań z systemem regulacji i niezawodności przedstawiono na rys. 1.3 [11, 12, 14, 23].

Z analizy rys. 1.3 wynika, że diagnostyka w równej mierze dotyczy diagnozowanego obiektu, jak i jego otoczenia oraz że realizowana jest w dwóch różnych czasach – newtonowskim t i bergsonowskim θ, ale ściśle ze sobą powiązanych działalnością diagnostyczną, w której zawsze są: badania diagnostyczne (realizowane w czasie t) i wnioskowanie diagnostyczne (realizowane w czasie θ).

Badania diagnostyczne (rys. 1.3) są podstawowym elementem diagnozowania i w znacznym stopniu decydują o jego skuteczności. Dzieli się je na kilka etapów, wśród których wyróżnia się:

I. Poznanie obiektu. W tej fazie badań diagnostycznych należy pozyskać szeroko pojętą wiedzę o obiekcie i jego otoczeniu, obejmującą:
   - formalny opis obiektu, opis budowy i działania w otoczeniu (w tym równania ruchu i charakterystyki statyczne i dynamiczne), technologię produkcji obiektu, charakterystyki niezawodności i bezpieczeństwa, a w tym zbiór typowych uszkodzeń generowanych przez nie sygnałów diagnostycznych,
   - opis sygnałów diagnostycznych, ich naturę fizyczną i stopień zakłócenia.

II. Pomiar sygnałów diagnostycznych. Tu dobiera się potrzebne środki pomiarowe, a następnie opracowuje się precyzyjną instrukcję wykonywania pomiarów. Instrukcja ta powinna obowiązywać w niezmiennej formie przez cały czas życia obiektu. Szczególnego znaczenia nabiera tu wymagane zapewnienie odpowiednio stałej dokładności (klasy) pomiarów oraz powtarzalności (identyczności) ustawienia środków pomiarowych na/w obiekcie podczas kolejnych badań diagnostycznych.

III. Usuwanie zakłóceń z sygnałów diagnostycznych. Proces ten realizowany jest przez zastosowanie w układach pomiarowych odpowiednich filtrów (dolnoprzepustowych, górnoprzepustowych, pasmowych, grzebieniowych, Wienera itd.) lub (co jest bardziej efektywne i uniwersalne) korelatorów do przetworzenia zmierzonych przebiegów sygnałów (w czasie dynamicznym t) na przebiegi funkcji korelacji (w czasie przesunięcia τ), a następnie na funkcję gęstości mocy widmowej sygnału (zależnej od częstotliwości ω). Należy dostrzec, że czas τ i częstotliwość są jedynie inną formą wyrażenia przestrzeni czasu t. Dodatkowo wiadomo, że dwa zmierzone sygnały $x(t)$ i $y(t)$ dają się przetworzyć na trzy sygnały korelacji $R_{xx}(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$ i $R_{yy}(\tau)$ i na trzy sygnały gęstości mocy widmowej

$S_{xx}(\omega)$, $S_{xy}(\omega)$ i $S_{yy}(\omega)$ oraz na kwadrat wzmocnienia amplitudowego $|A|^2 = \frac{S_{yy}}{S_{xx}}$ oraz na przesunięcie fazy $\varphi = Arg\frac{S_{xy}}{S_{xx}}$ [12, 13, 20, 22].

IV. Formowanie sygnałów diagnostycznych. Czynność ta ma za zadanie sprowadzenie wszystkich mierzonych sygnałów do postaci bezwymiarowej. Wartością odniesienia mierzonego sygnału diagnostycznego jest jego wartość obliczeniowa wynikająca z projektu obiektu lub wartość ustalona podczas prób fabrycznych lub wartość ustalona podczas przekazywania obiektu z systemu produkcji do systemu eksploatacji. W ten sposób do „teraźniejszości" θ_1 wprowadzana jest „przeszłość" θ_0 wynikająca z projektu obiektu (np. projekt pompy przewiduje ciśnienie tłoczenia 210 at przy objętościowym natężeniu przepływu 10 l/s, a producent wyprodukował pompę odpowiednio 200 at i 9 l/s, to wielkości względne odniesione do projektu wynoszą 0,95 i 0,9, co należy uznać za słaby wynik). Znamienny jest tu fakt, że ocenę obiektu otrzymuje się już na wstępie badań [11, 16, 23].

V. Opracowanie bazy danych. Bazą danych są tabele wskaźników jakości przebiegów uformowanych sygnałów, funkcji korelacji i gęstości mocy widmowej sygnałów. Przyjęte wskaźniki jakości powinny nawiązywać swoją naturą fizyczną do „czasu regulacji" i „wartości przeregulowania", stosowanych w ocenie jakości układów automatycznej regulacji. Bazą danych mogą też być macierze parametrów modeli matematycznych wyznaczone metodami identyfikacji statycznej i dynamicznej. Opracowanie bazy danych jest etapem końcowym badań diagnostycznych, identyfikacji obiektu [11, 23].

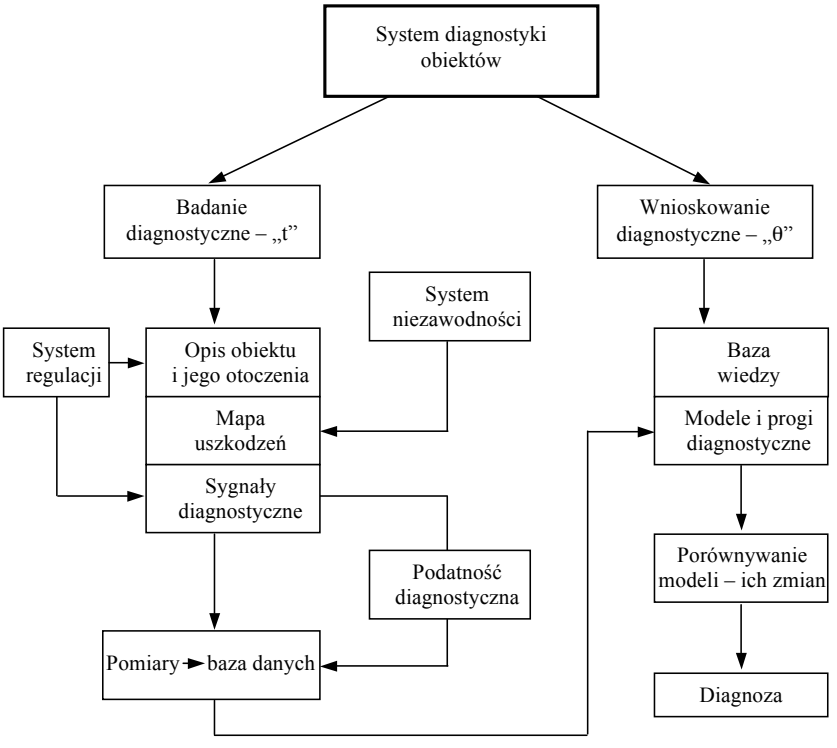
Wnioskowanie diagnostyczne (rys. 1.3) jest kolejnym, równie ważnym jak badanie diagnostyczne, elementem diagnozowania. Polega na przetworzeniu wyników badania diagnostycznego (bazy danych) oraz innych informacji o obiekcie i otoczeniu (bazy wiedzy) na diagnozę, genezę i prognozę. We wnioskowaniu diagnostycznym wyróżnia się kilka różnych faz [11, 12]:

I. Opracowanie modelu diagnostycznego. Polega na powiązaniu (na podstawie posiadanej wiedzy) sygnałów diagnostycznych ze zmianami stanu technicznego (uszkodzeniami) obiektu. Formalne powiązanie sygnałów diagnostycznych, wskaźników jakości przebiegów sygnałów, parametrów diagnostycznych z uszkodzeniami jest bezwzględnie konieczne w procesie diagnozowania. Model diagnostyczny umożliwia „zapamiętanie" (ciągle zmieniającego się) stanu technicznego obiektu w aktualnej chwili diagnozowania θ_0 i zachowanie go do następnych

chwil diagnozowania θ_1, θ_2 itp. Zatem bez modelu diagnostycznego nie można zrealizować zasad diagnostyki bazujących na porównywaniu stanów bieżących (teraźniejszość) obiektu ze stanami poprzednimi (przeszłość) i prognozowanymi (przyszłość).

II. Opracowanie algorytmów porównywania modeli diagnostycznych. Obejmuje zasady porównywania modeli z aktualnego diagnozowania z modelami poprzednimi z historii życia obiektu (czas θ). Otrzymane zmiany postaci i parametrów modelu przetwarzane są na zmiany stanu technicznego obiektu.

III. Komputerowe wspomaganie wnioskowania diagnostycznego. Podejmuje problematykę skutecznego eliminowania z procesu wnioskowania diagnostycznego subiektywnego działania diagnosty i zastąpienie go obiektywnym (zawsze identycznie działającym teraz i po wielu latach) systemem eksperckim. Okazuje się bowiem (a praktyka to potwierdza), że komputerowo zapewniona identyczność wnioskowania jest znacznie bardziej efektywna niż inteligencja diagnosty czasu bieżącego i następujących po nim zupełnie różnych diagnostów.



Rys. 1.3. Schemat systemu diagnostyki i jego związków z systemami regulacji i niezawodności [11]

1.2.2. Szczegółowe wytyczne realizacji działań diagnostycznych

1.2.2.1. Terminy i definicje

Na potrzeby realizacji działań diagnostycznych stosuje się następujące terminy i definicje (NO – 15 – A801:2007):

1. **Obiekt diagnozowania –** wojskowy statek powietrzny, płatowiec, silnik, agregat, urządzenie, zespół oraz układ funkcjonalny płatowca lub silnika, element konstrukcyjny, podlegający diagnozowaniu i jego otoczenie.
2. **System diagnostyczny wojskowego statku powietrznego –** zespół elementów realizujących metody diagnozowania, obejmujący **obiekt diagnozowania** w otoczeniu, metody, modele i środki diagnostyczne, działania diagnostów, użytkowników, służb obsługi i decydentów oraz informacje dotyczące odpowiednich zależności między tymi elementami.
3. **Ocena stanu technicznego obiektu –** sprawdzenie zgodności wyników pomiarów z wymaganiami, jakie mają one spełniać, i na tej podstawie, cech określających stan techniczny badanego obiektu. UWAGA: Analiza wyników sprawdzeń bieżących i poprzednich, wykonana przez diagnostę lub urządzenie (automat) diagnostyczne, prowadzi do sformułowania diagnozy. Określa ona z wymaganą dokładnością stan techniczny obiektu w chwili przeprowadzania badań i jego zdolność do wykonania zadania.
4. **Dozorowanie –** bieżąca obserwacja stanu technicznego **obiektu diagnozowania** prowadzona w sposób ciągły lub sekwencyjny. UWAGA: Dozorowanie stosuje się w procesie kontroli zużywania obiektu diagnozowania.
5. **Geneza stanu niezawodności –** efekt działalności diagnostycznej, określający czas, miejsce i przyczyny powstałego stanu niezdatności. UWAGA: Do wykonania genezy konieczna jest diagnoza, bieżąca i z poprzednich badań, niektórych charakterystyk niezawodnościowych, intensywności i czasu działania czynników zużywania i uszkadzania elementów. Geneza jest niezbędna do określenia przyczyn szczególnie niebezpiecznych stanów zagrażających bezpieczeństwu lotów, a także do badania wypadków lotniczych. Wyniki genezy są wykorzystywane do planowania przedsięwzięć profilaktycznych.

6. **Lokalizacja uszkodzeń –** poszukiwanie miejsca powstania uszkodzenia badanego **obiektu diagnozowania**.
7. **Prognozowanie stanu technicznego –** działalność diagnostyczna mająca na celu określenie stanu zdatności **obiektu diagnozowania** w przyszłości. UWAGA: Prognozowanie przeprowadza się na postawie oceny stanu technicznego w chwili badania i znajomości stanów przeszłych, a także na podstawie znajomości intensywności i czasu działania czynników determinujących proces zużywania i uszkadzania. Prognozę stanu zdatności obiektu określa się z pewnym prawdopodobieństwem, uwzględniając określony czas, nie krótszy niż do najbliższego wylotu lub do kolejnego diagnozowania.
8. **Monitorowanie –** ciągłe gromadzenie informacji i informowanie użytkownika o stanie działania **obiektu diagnozowania** (także za pomocą specjalnych układów służących do ostrzegania użytkownika) oraz udzielenie użytkownikowi instrukcji i rad w celu optymalizacji jego działania podczas wystąpienia stanów awaryjnych.
9. **Procedura diagnostyczna –** uporządkowana działalność diagnostyczna, ukierunkowana na rozpoznanie stanu technicznego **obiektu diagnozowania.** UWAGA: Procedury diagnostyczne są częścią składową procedur obsługowych i najczęściej w odpowiedni sposób warunkują prace obsługowe. Jeżeli w wyniku prac diagnostycznych okaże się, że obiekt diagnozowania jest zdatny, wówczas podejmuje się prace o charakterze profilaktycznym (czynności realizowane planowo). W innym przypadku konieczne są prace naprawcze (regulacja, naprawa, wymiana), przywracające badanemu obiektowi utraconą zdatność techniczną.
10. **Model diagnostyczny –** wyrażona zależność między zmianami stanu technicznego **obiektu diagnozowania** a generowanymi przez nie parametrami i sygnałami diagnostycznymi obiektu. UWAGA: Wykorzystywanie modelu diagnostycznego umożliwia:
    - przeprowadzenie analizy złożonego obiektu w celu określenia jego podatności diagnostycznej i wrażliwości poszczególnych sygnałów diagnostycznych na zmianę stanu technicznego obiektu,
    - wybór parametrów i sygnałów diagnostycznych obiektu i opracowanie procedur diagnostycznych,
    - wybór metod diagnozowania i przeprowadzenie syntezy systemów diagnostycznych.

11. **Podatność diagnostyczna –** właściwości **obiektu diagnozowania** (systemu) określające jego dostosowanie do realizacji procesu diagnozowania. UWAGA: Podatność diagnostyczna kształtowana jest w procesie projektowania i produkcji wojskowego statku powietrznego. Obejmuje wiedzę o diagnozowanym obiekcie i własności obiektu umożliwiające wykonanie badań diagnostycznych.
12. **Wymagania diagnostyczne –** ilościowy lub jakościowy opis cech, jakie powinien mieć **system diagnostyczny wojskowego statku powietrznego** (tj. obiekt diagnozowania, metody i środki diagnostyczne, działanie diagnostyczne). UWAGA: Wymagania diagnostyczne są uwzględniane w fazie opracowania koncepcji i projektowania wojskowych statków powietrznych i ich systemów eksploatacji. Wymagania diagnostyczne dotyczą zwiększenia podatności diagnostycznej statków powietrznych, lepszego ich dostosowania do potrzeb diagnozowania i są związane z problemami wynikającymi z postępującej instrumentalizacji procesów diagnozowania.
13. **Stanowisko diagnostyczne –** zestaw diagnostyczny (patrz PN-90/N-04002) na stanowisku działalności diagnostycznej. UWAGA: Stanowiska diagnostyczne są stacjonarne i ruchome.
14. **Potencjał eksploatacyjny –** zasób możliwej trwałości i odporności **obiektu diagnozowania** na prognozowane obciążenia wynikające z przewidywanego procesu użytkowania.

1.2.2.2. Wytyczne dotyczące systemu diagnostycznego

1. Wojskowe statki powietrzne powinny być wyposażone w system diagnostyczny. Systemy diagnostyczne wojskowych statków powietrznych powinny być jednoznacznie określone i powinny być dokładnie opisane.
2. Systemy diagnostyczne powinny spełniać wymagania jakości działania i niezawodności rozwiązań. Systemy te powinny zapewniać bezpieczeństwo lotów oraz wysoką gotowość wykonania zadania przez wojskowe statki powietrzne, a także wykorzystanie ich potencjału eksploatacyjnego oraz obniżenie kosztów eksploatacji.
3. System diagnostyczny powinien być opracowany na etapie projektowania wojskowego statku powietrznego i powinien uwzględniać całokształt proponowanych metod oraz niezbędnych środków diagnostycznych wynikających z charakterystyk niezawodnościowych

obiektu diagnozowania i jego rzeczywistej podatności diagnostycznej. Powinny być również opracowane sposoby sprawdzania systemu diagnostycznego podczas prób fabrycznych, badań kwalifikacyjnych, w czasie eksploatacji i po naprawie wojskowego statku powietrznego.

4. System diagnostyczny powinien być dostosowany do systemu eksploatacji wojskowego statku powietrznego (eksploatacja według resursu, stanu technicznego, z kontrolą parametrów stanu technicznego, z kontrolą poziomu niezawodności lub systemu mieszanego).
5. System diagnostyczny wojskowego statku powietrznego powinien być włączony do systemu eksploatacji w zakresie użytkowania i obsługi.
6. System diagnostyczny wojskowego statku powietrznego powinien mieć środki do diagnozowania zainstalowane na pokładzie statku (pokładowy układ diagnostyczny) i naziemne (naziemny układ diagnostyczny).
7. Pokładowy układ diagnostyczny powinien umożliwiać:
   - kontrolę parametrów, obowiązkowych ze względu na ocenę działania wojskowego statku powietrznego z ich wizualizacją w kabinie pilota,
   - pomiar i rejestrację sygnałów diagnostycznych, przeznaczonych do analizy naziemnej,
   - sygnalizację stanów awaryjnych,
   - rejestrację parametrów obiektywnej kontroli lotu, umożliwiających uzyskanie informacji niezbędnych do analizy zdarzeń lotniczych, oceny wykonania zadań lotniczych i nadzoru nad procesem użytkowania wojskowego statku powietrznego,
   - kontrolę działania pokładowego układu diagnostycznego (samokontrola).
8. Naziemny układ diagnostyczny powinien umożliwiać (bez wymontowywania z wojskowego statku powietrznego elementów i urządzeń diagnozowanych):
   - ocenę, prognozę i genezę stanu technicznego wojskowego statku powietrznego, agregatów, urządzeń, zespołów i układów oraz określonych miejsc konstrukcji wojskowego statku powietrznego,
   - rejestrację sygnałów diagnostycznych służących do oceny i prognozowania stanu technicznego wojskowego statku powietrznego, agregatów, urządzeń, zespołów i układów funkcjonalnych

wojskowego statku powietrznego, a także do lokalizacji uszkodzeń wojskowego statku powietrznego, do głębokości wymaganej w procesie diagnozowania,
- opracowanie propozycji prac profilaktycznych i naprawczych,
- archiwizację informacji diagnostycznych wojskowego statku powietrznego, uzyskanych podczas jego użytkowania i obsługi technicznej,
- kontrole zdatności naziemnego układu diagnostycznego (samokontrola).

1.2.2.3. Podstawowe cechy systemu diagnostycznego

1. Podatność diagnostyczna systemu diagnostycznego

Istnieje ścisła zależność między realizacją zadań diagnostycznych a podatnością diagnostyczną systemu. Dlatego, w zależności od zakresu realizowanych zadań diagnostycznych, należy zapewnić:

- podatność badawczą systemu diagnostycznego, tj. dostosowanie obiektu diagnozowania do realizacji badań diagnostycznych, stosując w konstrukcji wojskowego statku powietrznego: wzierniki przeglądowe, elektryczne złącza diagnostyczne, króćce ułatwiające pomiar parametrów w układach pneumatycznych, hydraulicznych, paliwowych i zasilania, wbudowane elementy kontroli oraz stosując w badaniach specjalną i uniwersalną aparaturę pomiarową, a także zapewniając wymaganą wiedzę o obiekcie (w tym charakterystyki statyczne, dynamiczne i niezawodnościowe) diagnostów o odpowiednich kwalifikacjach itp.,
- podatność na lokalizację uszkodzeń, tj. dostosowanie systemu diagnostycznego do procesu lokalizacji uszkodzeń, uwarunkowaną dodatkowo wiedzą o symptomach uszkodzeń, prawdopodobieństwach uszkodzeń, możliwościach zastosowania optymalnych algorytmów lokalizacji uszkodzeń, organizacją ewidencji i obróbki informacji o uszkodzeniach itp.,
- podatność genezowania, tj. dostosowanie systemu diagnostycznego do procesu genezowania (przewidywania przyczyn zmiany stanu technicznego na podstawie obserwowanych skutków). Skuteczność procesu genezowania jest uwarunkowana zastosowaniem pokładowych rejestratorów katastroficznych wg NO-16-A200:2006, zapew-

niających niezniszczalny podczas awarii zapis odpowiednich parametrów działania silników, instalacji silnikowych i układów płatowca, przemieszczeń elementów układów sterujących, położenia obiektu w przestrzeni i informacji o użytkowaniu wojskowego statku powietrznego przez pilota (załogę),

- podatność prognostyczną, tj. dostosowanie systemu diagnostycznego do realizacji procesu prognozowania (przewidywania zdarzeń na podstawie wiedzy dotyczącej zmian zachodzących w obiekcie diagnozowania), która uwarunkowana jest rejestracją sygnałów parametrów diagnostycznych, w określonych odstępach czasu (lub po określonej liczbie cyklów działań), wiedzą o prędkości propagacji uszkodzeń, organizacją zbierania i analizy informacji diagnostycznych,
- podatność dozorowania, tj. dostosowanie systemu diagnostycznego do śledzenia niebezpiecznych procesów zachodzących w obiekcie diagnozowania, uwarunkowaną wiedzą o objawach uszkodzeń w postaci nieprawidłowości działania oraz zastosowaniem pokładowych automatycznych układów śledzenia i sygnalizacji o stanach awaryjnych itp.

2. Sygnały, metody i modele diagnostyczne

W zależności od rodzaju i przeznaczenia systemu diagnostycznego wojskowego statku powietrznego należy ustalić:

- liczbę sygnałów diagnostycznych, informujących o stanie technicznym badanego obiektu diagnozowania,
- algorytmy i programy diagnozowania, zapewniające prawidłową obsługę dla założonej strategii eksploatacji wojskowego statku powietrznego,
- wymagania dotyczące badań części (elementów) z zastosowaniem środków do badań nieniszczących,
- wymagania dotyczące diagnozowania układów płatowca na podstawie analizy uszkadzalności z użyciem modeli analitycznych (niezawodnościowych),
- wymagania dotyczące kontroli działania i oceny stanu technicznego wirnika nośnego śmigłowca, w tym warunki zastosowania specjalnych układów pomiaru drgań, zmian charakterystyk łopat oraz wykrywania uszkodzeń łopat, łożysk i tłumików piasty,

– wymagania dotyczące podstawowych metod diagnozowania silników, którymi są: analiza drgań i sygnałów wibroakustycznych, analiza zmian wartości parametrów termogazodynamicznych, analiza zmian parametrów pracy silnika i układów regulacji w zakresach ustalonych i w procesach przejściowych,
– wymagania dotyczące diagnozowania układów tribologicznych na podstawie analizy zawartości produktów ścierania w oleju i cieczach roboczych.

1.2.2.4. Środki do realizacji procesu diagnozowania

1. Środki diagnostyczne

Do środków diagnostycznych należą: układy pomiarowe, systemy przetwarzania informacji, zespoły elementów technicznych, układy kontrolne (kontrola działania), specjalne urządzenia i stanowiska diagnostyczne, a także diagnosta, umożliwiające zrealizowanie badania i wnioskowanie diagnostyczne.

Środki diagnostyczne powinny:
– być niezawodne i wygodne w eksploatacji,
– być odporne na wpływ warunków zewnętrznych (temperatury, wilgotności, ciśnienia, gęstości powietrza),
– zapewniać niezależność wskazań przyrządów od ich położenia w przestrzeni (na ziemi i w locie),
– odznaczać się niezbędną dokładnością, dużą czułością i szybkością działania,
– być zautomatyzowane i w dużym stopniu znormalizowane, ich wpływ na prace innych układów i przyrządów (szczególnie kontrolnych) powinien być określony i nieznaczny,
– mieć układ samokontroli,
– być zasilane z elektrycznej sieci pokładowej w przypadku urządzeń pokładowych i z autonomicznych lub lotniskowych źródeł zasilania w przypadku urządzeń naziemnych,
– mieć minimalne gabaryty i masę,
– spełniać wymagania dotyczące urządzeń wojskowej techniki lotniczej.

2. Stanowiska diagnostyczne

Stanowiska diagnostyczne powinny być funkcjonalne (odpowiadać potrzebom), a zatem umożliwiać:

a) sprawdzenie stanu technicznego wojskowego statku powietrznego przed lotem, po zakończeniu lotu i podczas wykonywania prac okresowych we wszystkich warunkach bazowania,
b) zgromadzenie (głównie podczas standardowych prób naziemnych wojskowego statku powietrznego) informacji diagnostycznej i przetworzenie jej w celu:
   – określenia i udokumentowania aktualnego stanu technicznego,
   – lokalizacji uszkodzeń,
   – zapewnienia optymalnej i jednolitej regulacji,
   – prognozowania czasu bezawaryjnej pracy silnika i płatowca.

Wymagania taktyczno-techniczne

Stanowiska diagnostyczne powinny spełniać wymagania taktyczno-techniczne:

- być wykonane zgodnie z normami NO–06–A101:2005 i NO–06–A103:2005 i powinny funkcjonować we wszystkich warunkach otoczenia; w celu wyeliminowania wpływu niskich i wysokich temperatur na prace środków diagnostycznych pomieszczenie, w którym umieszcza się stanowisko, powinno być klimatyzowane, a temperatura i wilgotność pomieszczeń powinna być dostosowana do wymagań tych środków,
- zapewniać odpowiedni czas osiągania gotowości do pracy poszczególnych urządzeń i układów stanowiska oraz stanowiska w całości – nie dłuższy niż przyjęty w wymaganiach operacyjnych,
- być wykonane zgodnie z przepisami przeciwpożarowymi i bhp; nie powinny stwarzać niebezpieczeństwa dla użytkowników i wojskowego statku powietrznego,
- zapewniać odporność układów stanowiska na zakłócenia i nie powinny zakłócać pracy układów kontrolnych wojskowego statku powietrznego,
- zapewniać odpowiedni czas potrzebny do sprawdzenia wojskowego statku powietrznego – możliwie najkrótszy i nie dłuższy niż czas trwania standardowej próby silnika (silników),
- być użytkowane przez etatowo przydzielonych i odpowiednio wyszkolonych operatorów stanowiska; spełniać wymagania ergonomii w zakresie rozmieszczenia urządzeń i pomieszczenia,

– być dostosowane do transportu lądowego, powietrznego i wodnego,
– spełniać wymagania dotyczące urządzeń przeznaczonych do ciągłego stosowania podczas prób i kolejnej obsługi wojskowego statku powietrznego.

Wymagania użytkowe

Stanowiska diagnostyczne powinny być dostępne do obsługi i użytkowania:

– umożliwiać sprawdzenie wojskowego statku powietrznego (płatowiec i silnik) podczas próby silnika w różnym zakresie, zgodnie z rzeczywistymi potrzebami wynikającymi z aktualnie wykonywanych prac,
– mieć urządzenia przeznaczone do sprawdzenia wstępnego wcześniej określonych układów składowych płatowca (instalacje) i silnika przed próbą silnika,
– umożliwiać bezpośrednią (w czasie rzeczywistym) obserwację określonych parametrów kontrolnych (prędkość obrotowa silnika, temperatura spalin za turbiną, elektryczne sygnały automatyki, sygnały stanów awaryjnych itp.) podczas próby silnika,
– umożliwiać uzyskanie rezultatów badań diagnostycznych (po uprzednim wyświetleniu na monitorze) w postaci zapisów przebiegów sygnałów i tablic wartości parametrów diagnostycznych w charakterystycznych chwilach pracy układów silnika i płatowca,
– umożliwiać dostęp do podstawowych informacji diagnostycznych o stanie technicznym wojskowego statku powietrznego w czasie trwania próby silnika, a pozostałych – bezpośrednio po zakończeniu próby, gdy stanowisko pozostaje podłączone do wojskowego statku powietrznego.

Wymagania konstrukcyjne, technologiczne i naprawcze

Stanowiska diagnostyczne powinny spełniać niżej wymienione wymagania konstrukcyjne, technologiczne i naprawcze:

– powinny być zbudowane ze zunifikowanych i znormalizowanych elementów (elementy elektroniczne, przetworniki, złącza itp.),
– powinny mieć zapewnioną podatność diagnostyczną konstrukcji stanowiska; powinien być wygodny dostęp do wszystkich jego elementów wymagających regulacji, sprawdzania i wymiany,

- ich organy ręcznego sterowania nie powinny samoczynnie zmieniać swego położenia,
- ich przyrządy, wrażliwe (mechanicznie) urządzenia, mikrokomputery, monitory i drukarki, powinny być zainstalowane na amortyzatorach; mikrokomputer, monitor i drukarka powinny być łatwe do wymontowania,
- ich obsługi okresowe powinny być przeprowadzane zgodnie z potrzebami wynikającymi z aktualnego stanu technicznego stanowiska i bez demontażu jego zespołów,
- ich naprawy powinny być wykonywane przez specjalistów wskazanych przez producentów stanowiska diagnostycznego i ich urządzeń,
- powinna być konstrukcyjnie wykluczona możliwość błędnego połączenia zespołów stanowiska diagnostycznego i stanowiska diagnostycznego do wojskowego statku powietrznego,
- powinny mieć komplet dokumentacji technicznej, przede wszystkim opis techniczny stanowiska diagnostycznego, instrukcje obsługi stanowiska, programy kontroli i diagnozowania obiektu (silnika i płatowca),
- powinny być przyjęte prorozwojowe rozwiązania umożliwiające, w miarę uzyskiwania wiedzy i informacji diagnostycznej o obiekcie diagnozowania, tworzenie dalszych programów prowadzących do ciągłego zwiększania efektywności procesów diagnozowania wojskowego statku powietrznego.

Wymagania niezawodnościowe

Stanowiska diagnostyczne powinny spełniać założone wymagania niezawodnościowe:

- zapewniać bezkolizyjny obieg informacji między elementami składowymi stanowiska oraz statkiem powietrznym i stanowiskiem,
- zapewniać ciągły czas pracy urządzeń i układów stanowiska, podczas realizacji procesu diagnozowania,
- zapewniać niezawodność diagnozowania niezależnie od warunków otoczenia i czasu pracy stanowiska diagnostycznego,
- być zabezpieczone przed uszkodzeniami mechanicznymi, zabrudzeniem, zamoczeniem, przegrzaniem, stratą informacji itp.,

– zapewniać możliwość określenia zdatności stanowiska na podstawie specjalnych testów (autotest),
– być poddawane niezawodnościowym badaniom wstępnym i kwalifikacyjnym zgodnie z odpowiednią NO.

Wymagania dotyczące osprzętu obiektu diagnozowania i specjalnego wyposażenia stanowiska diagnostycznego

Specjalne wyposażenie stanowiska diagnostycznego i osprzęt obiektu diagnozowania powinny spełniać niżej wymienione wymagania:

– osprzęt powinien spełniać takie same wymagania jak konstrukcja wojskowego statku powietrznego,
– wyposażenie powinno spełniać takie same wymagania jak konstrukcja stanowiska diagnostycznego,
– czujniki i przetworniki pomiarowe oraz instalacja do gromadzenia informacji diagnostycznej powinny być zainstalowane na wojskowym statku powietrznym,
– osprzęt powinien mieć gniazda (płatowiec, silnik) służące do podłączenia stanowiska diagnostycznego do obiektu diagnozowania, silnika, płatowca i innych zespołów,
– wyposażenie powinno mieć czujniki i przetworniki pomiarowe oraz przyrządy zainstalowane w stanowisku diagnostycznym,
– przewody łączące stanowisko diagnostyczne z wojskowym statkiem powietrznym powinny być zabezpieczone przed zakłóceniami i uszkodzeniami,
– urządzenia stanowiska diagnostycznego powinny przetwarzać sygnały analogowe, dwustanowe i częstotliwościowe na informację dostępną dla systemu komputerowego,
– wyposażenie powinno mieć system komputerowy,
– wyposażenie powinno mieć oprogramowanie do przetwarzania, dokumentowania i archiwizacji informacji diagnostycznej,
– wyposażenie powinno mieć oprogramowanie do sprawdzania, skalowania i legalizacji układów stanowiska diagnostycznego.

Stanowisko diagnostyczne powinno mieć dodatkowo:

– specjalne wyposażenie do sprawdzania zespołów silnika i płatowca podczas prac obsługowych,
– układy i urządzenia do kontroli metrologicznej czujników, przetworników,

– układy umożliwiające pobór energii elektrycznej i sprężonego powietrza z zewnętrznych źródeł zasilania poprzez zunifikowane gniazda elektryczne i przyłącza,
– instalacje łączności między operatorem stanowiska diagnostycznego a mechanikiem prowadzącym próbę silnika (silników) w kabinie pilota oraz mechanikiem obserwującym próbę silnika na zewnątrz statku powietrznego.

1.2.2.5. Środki do badań nieniszczących

Realizacja badań nieniszczących jest złożona. Do przeprowadzenia badań nieniszczących konieczny jest wybór właściwych metod i środków badań nieniszczących, zdefiniowanie kryteriów oceny wad uszkodzeń ukrytych badanych elementów i określenie wymagań dotyczących kwalifikacji personelu przeprowadzającego badania.

1. W procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych należy stosować następujące metody badań: optyczna, penetracyjna, magnetyczna, wiroprądowa, ultradźwiękowa i radiograficzna.
2. Badania nieniszczące powinny być poprzedzone:
   – wskazaniem elementów wojskowego statku powietrznego, które podlegają badaniom; wskazaniem krytycznych obszarów w każdym badanym elemencie,
   – ustaleniem maksymalnej dopuszczalnej wartości wady,
   – wskazaniem najbardziej niebezpiecznego ukierunkowania wady, w przypadku określonego elementu; wyborem najwłaściwszej w danym przypadku metody badań nieniszczących.
3. Badania nieniszczące powinny być przewidziane w fazie projektowania i badań wojskowego statku powietrznego. Ich stosowanie w eksploatacji wymaga szczegółowych instrukcji, w których należy wskazać:
   – elementy podlegające badaniu,
   – miejsca elementów wymagające szczególnego badania,
   – sposób dostępu do miejsc podlegających badaniu,
   – sposób przygotowania określonej części do przeprowadzenia badania,
   – urządzenia i przyrządy konieczne do przeprowadzenia badania,
   – inną metodę badania stosowaną w celu upewnienia się, że otrzymane wyniki są prawidłowe,

- elementy, które wymagają wymontowania z wojskowego statku powietrznego w celu przeprowadzenia badań.

4. Do przeprowadzenia badań nieniszczących powinny być opracowane odrębne przepisy i instrukcje, w których powinny być określone, zalecane do badań, okresy eksploatacji. Należy również podać szczególne przypadki eksploatacyjne, po których należy przeprowadzać badania nieniszczące (np. po wystąpieniu nadmiernych przeciążeń wojskowego statku powietrznego, po zassaniu przez silnik ciała obcego itp.).
5. Aparatura do przeprowadzania badań nieniszczących w warunkach eksploatacji powinna mieć:
   - małe gabaryty i małą masę,
   - wysoką niezawodność wskazań,
   - zrozumiałe oznaczenia,
   - możliwość rejestracji wyników badań,
   - uniwersalne zastosowanie,
   - autonomiczne źródło zasilania,
   - wysoką odporność na uszkodzenia mechaniczne,
   - możliwość niezawodnej pracy w różnych warunkach klimatycznych,
   - możliwość, dzięki specjalnemu wyposażeniu, przeprowadzania badań elementów w trudno dostępnych i niewidocznych miejscach.

1.2.2.6. Wytyczne dotyczące dokumentacji systemu diagnostycznego

Wojskowy statek powietrzny powinien być wdrażany do eksploatacji na podstawie dokumentacji zawierającej niżej wymienione informacje dotyczące systemu diagnostycznego:

- opis techniczny i technologiczny wojskowego statku powietrznego,
- charakterystyki podatności diagnostycznej elementów, urządzeń, zespołów i układów funkcjonalnych wojskowego statku powietrznego,
- opis zadań kontroli i diagnozowania, realizowanych w odpowiednich pododdziałach jednostki eksploatującej wojskowe statki powietrzne danego typu,
- wykaz elementów konstrukcyjnych podatnych na uszkodzenie,
- wymagana głębokość diagnozowania z zastosowaniem pokładowych i naziemnych środków kontroli i diagnozowania,

- wykaz przyczyn niezdatności i uszkodzeń podlegających lokalizacji i identyfikacji,
- wykaz uszkodzeń, z którymi zezwala się na wylot, i ograniczeń z tym związanych,
- zestaw sygnałów, parametrów i charakterystyk statycznych i dynamicznych diagnozowanych obiektów,
- opis informacji uzyskiwanych z pokładowego układu diagnostycznego (rejestracja, zobrazowanie i wykorzystanie tej informacji),
- wykaz naziemnych środków diagnostycznych,
- wzorce normatywne metrologicznego zabezpieczenia kontroli i diagnozowania,
- instrukcje, metody i techniki dotyczące kontroli i diagnozowania elementów, urządzeń, zespołów i układów funkcjonalnych wojskowego statku powietrznego.

1.2.3. Szczegółowe wytyczne dotyczące systemów diagnostycznych płatowca

1.2.3.1. Wymagania podstawowe

Badania diagnostyczne płatowca powinny być dostosowane do założeń strategii eksploatacji wojskowego statku powietrznego, w związku z tym należy:

- zapewnić w sposób systemowo-konstrukcyjny podatność badawczą funkcjonalnych zespołów i układów, agregatów, urządzeń wojskowego statku powietrznego,
- zapewnić możliwość przeprowadzania badań diagnostycznych urządzeń (agregatów) bez ich demontażu,
- zapewnić możliwość badania i diagnozowania urządzeń zdemontowanych z pokładu wojskowego statku powietrznego,
- wyposażyć system diagnostyczny w odpowiednie układy kontroli i aparaturę badawczą oraz w środki przetwarzania informacji diagnostycznej,
- w instalacjach cieczowych układów funkcjonalnych płatowca przewidzieć zamontowanie czujników i przetworników pomiarowych systemu diagnostycznego, przeznaczonego do pomiaru ciśnienia, temperatur, gęstości, natężenia przepływu, poziomu itp.,

– zastosować w konstrukcji śmigłowców (wiropłatów) wbudowany na stałe system kontroli drgań, ze względu na wysoki poziom drgań elementów konstrukcji, szczególnie wirnika nośnego, śmigła ogonowego i zespołu przenoszenia mocy (przekładnie, wały napędowe),
– zastosować w samolotach i śmigłowcach system obiektywnej kontroli parametrów lotu wojskowego statku powietrznego; wymagania dotyczące pokładowych rejestratorów katastroficznych parametrów lotu oraz zbiory rejestrowanych parametrów dla różnych grup wojskowych statków powietrznych podano w normie NO–16–A200:2006.

1.2.3.2. Podatność diagnostyczna płatowca

W celu zapewnienia podatności diagnostycznej płatowca:
– powinny być dostępne miejsca występowania prawdopodobnych pęknięć, korozji, wżerów, nieprawidłowości połączeń, luzów i zużycia detali w celu wykonywania przeglądów i pomiarów,
– powinny być odpowiednio oznakowane miejsca występowania prawdopodobnych nieszczelności instalacji hydraulicznych, gazowych, paliwowych i olejowych,
– powinien być zapewniony dostęp do wykonawczych elementów układu sterowania samolotem (śmigłowcem) i silnikami w całym zakresie ich ruchu i powinna być zapewniona możliwość pomiaru luzów połączeń ruchowych wszystkich organów sterowania,
– powinien być zapewniony niezbędny dostęp do wszystkich elementów konstrukcji, układów i agregatów wymagających wyregulowania (nastawiania) w procesie eksploatacji,
– agregaty wymagające wyregulowania (nastawiania) w czasie pracy silnika powinny mieć regulacyjne węzły położone w bezpiecznych strefach,
– agregaty i bloki wojskowego statku powietrznego, przewidziane do wymiany w procesie eksploatacji, powinny cechować się łatwością demontażu,
– powinien być umożliwiony specjalny przegląd tzw. gorących części silnika i ich otoczenia, układu wysokościowego i przeciwoblodzeniowego wojskowego statku powietrznego.

1.2.3.3. Kontrola i badania diagnostyczne płatowca

Konstrukcja płatowca i jego układów funkcjonalnych oraz zastosowanie wbudowanych i zewnętrznych środków badań diagnostycznych powinny zapewniać możliwość wykonania:

- organoleptycznej kontroli w celu wykrycia zewnętrznych mechanicznych, termicznych i chemicznych zniszczeń i uszkodzeń elementów oraz nieprawidłowości ich mocowania i wzajemnego położenia,
- badań z zastosowaniem instrumentalnych środków w celu wykrycia zewnętrznych i wewnętrznych uszkodzeń elementów urządzeń, włącznie z ustaleniem wartości zmian parametrów,
- sprawdzenia działania systemów i urządzeń za pomocą środków pokładowych i aparatury naziemnej,
- badań obiektu w celu oceny stanu technicznego i wykrycia przyczyn występowania stanów niezdatności,
- sprawdzenia systemów (układów) i urządzeń pracujących w warunkach podwyższonego ciśnienia (z nadciśnieniem) w celu określenia szczelności,
- badań nieniszczących metodami defektoskopowymi i wibroakustycznymi w celu wykrycia ukrytych uszkodzeń i zmian strukturalnych w materiałach lub geometrycznych zmian rozmiarów i właściwości fizycznych,
- badań dotyczących koncentracji produktów ścierania w oleju i cieczach roboczych w celu określenia zużycia i uszkodzenia kinematycznych par trących obiektu (układów łożyskowania, instalacji hydraulicznej, przekładni, reduktora itp.),
- kontroli stanu wyregulowania urządzeń (agregatów) podtrzymujących wartości funkcjonalne parametrów w zakresie tolerancji określonych w warunkach technicznych,
- sprawdzenia jakości wykonanych prac demontażowo-montażowych, odtwarzających zdatność układów na skutek zamiany niezdatnych agregatów i urządzeń na zdatne.

1.2.4. Szczegółowe wymagania dotyczące systemów diagnostycznych lotniczych silników turbinowych

1.2.4.1. Wymagania podstawowe

Badania diagnostyczne silnika powinny być dostosowane do założeń strategii eksploatacji wojskowego statku powietrznego, w związku z tym powinna być zapewniona możliwość:

- oceny stanu technicznego i lokalizacji uszkodzeń oraz wiarygodnego prognozowania zdatności eksploatowanych urządzeń silnika,
- wyposażenia silnika w pokładowy (wbudowany) system wykrywania i natychmiastowego sygnalizowania niebezpiecznych uszkodzeń,
- zastosowania aparatury badawczej, środków automatycznej kontroli i środków przetwarzania informacji podczas badań na ziemi i podczas lotu statku powietrznego,
- badań i kontroli metodami wibroakustycznymi i badań nieniszczących, w przypadku określonych elementów i zespołów silnika,
- oceny stanu technicznego węzłów łożyskowych silnika według koncentracji produktów ścierania w oleju.

1.2.4.2. Podatność diagnostyczna lotniczych silników turbinowych

W celu zapewnienia podatności diagnostycznej lotniczych silników turbinowych:

- konstrukcja lotniczego silnika turbinowego powinna być dostosowana do diagnozowania bezpośrednio na wojskowym statku powietrznym w warunkach eksploatacji,
- system diagnostyczny powinien zawierać czujniki i przetworniki, stanowiące integralne elementy konstrukcji silnika, których sygnały są wykorzystywane do kontroli działania i do oceny stanu technicznego,
- powinna być przewidziana możliwość montowania odpowiednich czujników i przetworników pomiarowych na czas badania diagnostycznego silnika,
- powinny być przewidziane otwory technologiczne umożliwiające wprowadzenie urządzeń kontrolnych do przeprowadzenia oceny

stanu technicznego niedostępnych wewnętrznych powierzchni elementów silnika, które z dużym prawdopodobieństwem mogą ulegać uszkodzeniom w procesie eksploatacji,
- na zewnętrznych powierzchniach kadłuba powinny być przewidziane miejsca do zamontowania czujników i przetworników drgań wewnętrznych elementów konstrukcji silnika,
- powinno być możliwe uzyskiwanie informacji diagnostycznej, wystarczającej do określenia uszkodzeń wybranych elementów w początkowych stadiach rozwoju tych uszkodzeń,
- powinny być przewidziane miejsca w silniku do wmontowania czujników sygnalizujących zanieczyszczenia metaliczne w oleju oraz miejsca pobierania próbek oleju; miejsca ustawienia czujników i pobierania próbek oleju powinny być dostępne i zapewnić wiarygodną informację o zanieczyszczeniach i produktach zużycia,
- powinny być określone miejsca w silniku do zamontowania czujników sygnalizujących przegrzanie konstrukcji i wystąpienie pożaru,
- powinien być zapewniony wygodny dostęp do przetworników, czujników, agregatów, zespołów i elementów regulacyjnych silnika oraz łatwy ich demontaż,
- funkcjonalne układy i zespoły silnika powinny mieć określone wyjścia, umożliwiające dokonywanie niezbędnych pomiarów wielkości charakteryzujących stan ich działania,
- króćce i złącza przeznaczone do podłączenia aparatury diagnostycznej silnika powinny być zunifikowane; w czasie podłączania czujników i przetworników (lub innych urządzeń kontrolnych) do instalacji wypełnionych cieczą roboczą ubytki cieczy powinny być minimalne; złącza elektryczne powinny zapewnić jednoznaczne i bezpieczne podłączenie zewnętrznych urządzeń kontrolno-pomiarowych,
- powinna być możliwa wizualna kontrola stanu dyszy, wlotu do silnika, komory spalania, łopatek wszystkich stopni sprężarki i turbiny za pomocą sond optycznych,
- powinna być możliwa nieniszcząca kontrola łopatek sprężarki oraz łopatek i tarcz turbiny,
- powinno być możliwe przeprowadzenie badań i analizy produktów zużycia oleju w celu szczegółowej oceny stanu technicznego układów tribologicznych silnika,

– konstrukcja zabudowanych w silniku układów pomiaru parametrów kontrolnych oraz sposób zabudowy silnika w płatowcu powinny umożliwiać podłączenie naziemnych środków systemu diagnostycznego, służących do oceny stanu technicznego, lokalizacji i przewidywania uszkodzeń oraz prognozowania stanu technicznego.

1.2.4.3. Wymagania dotyczące badania diagnostycznego silnika

1. Konstrukcja silnika i jego układów funkcjonalnych oraz integralne środki diagnostyczne silnika powinny zapewniać możliwość kontroli i oceny stanu technicznego jego podstawowych części i węzłów, takich jak:
   – napędy zespołów,
   – węzły łożysk,
   – elementy kanału przepływowego silnika,
   – elementy instalacji paliwowej,
   – elementy układu automatycznej regulacji natężenia przepływu paliwa przez wtryskiwacze komór spalania silnika i dopalacza,
   – elementy instalacji olejowej, przeciwoblodzeniowej, rozruchowej i przeciwpożarowej.
2. Na pokładzie wojskowego statku powietrznego powinna być zapewniona (dla potrzeb diagnostyki) kontrola niżej wymienionych parametrów silnika:
   – prędkości obrotowej wirników silnika,
   – natężenia przepływu paliwa przez wtryskiwacze,
   – temperatury spalin,
   – drgań silnika,
   – ciśnienia i temperatury oleju na wejściu do silnika,
   – temperatury powietrza chłodzącego turbinę,
   – parametrów pracy sprężarki.
3. Na pokładzie wojskowego statku powietrznego powinna być zapewniona (dla potrzeb diagnostyki) sygnalizacja:
   – niedostatecznej lub nadmiernej ilości oleju w zbiorniku,
   – wystąpienia opiłków w oleju,
   – zanieczyszczenia filtru oleju,
   – spadku ciśnienia oleju,
   – niedostatecznego ciśnienia paliwa,
   – zanieczyszczenia filtra paliwa,

- pojawienia się symptomów przegrzania,
- wystąpienia niebezpiecznej temperatury spalin,
- pojawienia się niebezpiecznych drgań,
- niestatecznej pracy sprężarki.

4. Badania diagnostyczne silnika powinny obejmować zarejestrowanie:
   - prędkości obrotowych wirników silnika,
   - natężenia przepływu paliwa przez wtryskiwacze,
   - temperatury paliwa na wejściu do pompy,
   - ciśnienia paliwa w różnych wybranych miejscach układu paliwowego silnika,
   - poziomu drgań elementów silnika,
   - temperatury i ciśnienia powietrza oraz spalin w różnych wybranych strefach kanału przepływowego silnika,
   - natężenia przepływu oleju przez wtryskiwacze smarowania łożysk,
   - ciśnienia i temperatury oleju,
   - ilości oleju w zbiorniku,
   - temperatury powietrza chłodzącego turbinę oraz temperatury łopatek i tarcz turbiny,
   - liczby uszkodzeń powstających na elementach wirujących silnika,
   - symptomu przegrzania,
   - położenia dźwigni sterowania silnikiem,
   - położenia elementów mechanizacji sprężarki,
   - zmiany średnicy dyszy wylotowej,
   - przemieszczenia elementów regulacyjnych wlotu silnikowego.
5. Badania diagnostyczne układów tribologicznych powinny być przeprowadzone na podstawie:
   - badań koncentracji produktów zużycia w oleju smarującym,
   - badań wibroakustycznych.
6. Badania silnika metodami nieniszczącymi powinny obejmować elementy:
   - wytrzymałościowe,
   - silnie obciążone mechanicznie i cieplnie.
7. W badaniach diagnostycznych silników zaleca się zastosowanie odpowiednich metod i środków diagnostycznych, umożliwiających ocenę i śledzenie następujących procesów:
   - zbliżania się do obszaru niestatecznej pracy sprężarki,
   - zbliżania się do granic zrywania płomienia w komorach spalania,

– zmian ciągu (mocy),
– stopnia wypracowania potencjału eksploatacyjnego najbardziej obciążonych mechanicznie i cieplnie elementów silnika.

1.3. Regulacja w systemie eksploatacji obiektów i jej związki z niezawodnością

1.3.1. Ogólna charakterystyka regulacji w systemie eksploatacji

Obiekt techniczny powinien być prawidłowo wyregulowany. Oznacza to, że powinny być zapewnione prawidłowe relacje między sygnałami związanymi z funkcjonowaniem obiektu [10, 19, 21].

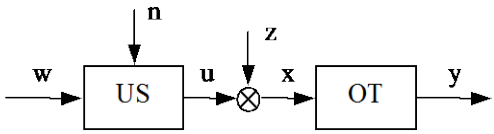
Zgodnie z zasadami automatyki wymaga się, aby obiekt techniczny był odporny na sygnały zakłóceń pochodzące od jego otoczenia oraz aby miał zdolność nadążania za sygnałami sterującymi nastawianymi przez użytkownika obiektu [12, 16, 22].

W procesie eksploatacji zaobserwowano, że podczas użytkowania obiekt zużywa się, a to powoduje między innymi jego rozregulowanie. W procesie obsługi do prawidłowego stanu działania obiekt doprowadza się poprzez zmianę nastaw jego urządzeń regulacyjnych. Zatem każda zmiana wymaganych nastaw regulatora wynikająca z zapewnienia wymaganej jakości działania obiektu (regulacja obiektu) ma swoją przyczynę w zmianie parametrów konstrukcyjnych, czyli stanu technicznego obiektu (diagnostyka obiektu).

Stopień zależności między stanem regulacji obiektu a jego stanem technicznym jest jednak różny. W skrajnych przypadkach obiekt niezdatny funkcjonalnie może być zdatny technicznie (źle wyregulowany silnik), a niezdatny technicznie zdatny funkcjonalnie (pęknięta łopatka) [6, 13].

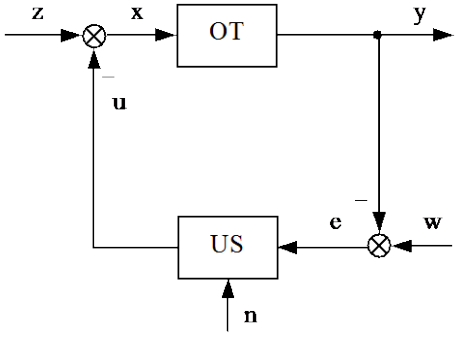
Intensywność wpływu poszczególnych elementów układu i parametrów elementów składowych układu oraz jego otoczenia na jakość funkcjonowania można ocenić na podstawie analizy funkcji wrażliwości konstrukcyjnej, parametrycznej i zakłóceniowej [10, 11, 20, 22].

Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie otwartym przedstawiono na rys. 1.4.



Rys. 1.4. Schemat układu – obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie otwartym: OT – obiekt techniczny, US – urządzenie sterujące, *w* – nastawna wartość sygnału użytkowego, *n* – nastawy urządzenia sterującego, *u* – sygnał oddziaływania US na OT, *z* – zakłócenie, *y* – sygnał użytkowy, *x* – sygnał pobudzający obiekt [12, 13]

Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie zamkniętym przedstawiono na rys. 1.5.



Rys. 1.5. Schemat układu – obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie zamkniętym: *OT* – obiekt techniczny, US – urządzenie sterujące, *w* – nastawiana wartość sygnału użytkowego, *n* – nastawy urządzenia sterującego, *u* – sygnał oddziaływania *US* na OT, *z* – zakłócenie, *y* – sygnał użytkowy, *x* – sygnał pobudzający obiekt, *e* – sygnał uchybu [12, 13]

Jak widać na rys. 1.4 i 1.5, do urządzenia sterującego US wprowadzona jest wartość zadania *w* sygnału użytkowego *y*. Ponieważ na obiekt (układ) zawsze działają bliżej nieokreślone zakłócenia *z*, to wymagana wartość sygnału użytkowego może być niesatysfakcjonująca (odbiegać i to znacznie od wartości zadanej *w*). W takiej niepożądanej sytuacji należy odpowiednio dopasować (ciągle rys. 1.4 i okresowo 1.5) nastawy *n* urządzenia sterującego US, aby w efekcie układ spełniał z odpowiednią jakością swoje użytkowe zadania. Krótko mówiąc, należy odpowiednio wyregulować urządzenie sterujące *US*.

Problem wyregulowania urządzeń sterujących (regulatorów) jest złożony. Może być rozwiązany na bazie szeroko rozumianych zasad automatyki. Wymaga się, ażeby każdy układ po wyregulowaniu był: stabilny, nadążny oraz miał odpowiednią jakość statyczną oraz dynamiczną.

Można stwierdzić, że istotna zmiana stanu technicznego (sygnałów lub parametrów stanu) obiektu spowoduje zmianę jego stanu regulacji (zmieniają się wskaźniki jakości działania) oraz jednocześnie spowoduje zmianę jego charakterystyk niezawodności. Ponieważ wymaga się, aby działanie i niezawodność były zawsze właściwe i stałe, to należy doregulować nastawy urządzenia sterującego (n – rys. 1.5) do potrzeb funkcjonalnych obiektu, a użytkowanie dostosować do aktualnych charakterystyk niezawodnościowych. Zatem zawsze wymagana zmiana nastaw urządzenia sterującego (wykonana podczas obsługi obiektu) świadczy także o jego zmianie stanu technicznego i stanie niezawodności. Należy domniemywać, że w eksploatacji obiektu technicznego może pojawić się taka sytuacja, że dobór nastaw urządzenia sterującego do nadmiernie zużytego (uszkodzonego obiektu) będzie niemożliwy. Ten fakt, gdy będzie prognozowany, staje się podstawą do predykcji charakterystyk niezawodnościowych obiektu.

Zatem można stwierdzić, że każda istotna zmiana stanu technicznego (diagnostyka) realizowana w czasie t i θ spowoduje zmianę nastaw regulacyjnych zgodnie z zasadami automatyki (czas t) i stąd konieczność ponownego wyznaczenia charakterystyk niezawodności (czas θ) [5, 13, 15, 19].

1.3.2. Szczegółowe wytyczne realizacji działań regulacji silnika lotniczego

1.3.2.1. Terminy i definicje

Na potrzeby realizacji czynności regulacyjnych podaje się następujące definicje (NO–16–A211):

1. **Silnik lotniczy –** maszyna przetwarzająca doprowadzane do niej paliwo i powietrze na energię mechaniczną, tzn. sterowany moment, ciąg lub sterowaną moc. UWAGA: W niniejszej normie silnik lotniczy rozpatrywany jest jako obiekt regulacji.

2. **Paliwowy układ zasilania silnika lotniczego –** urządzenia umożliwiające dostarczenie potrzebnej ilości paliwa o odpowiednich parametrach do komory spalania **silnika lotniczego**.
3. **Układ regulacji silnika lotniczego –** silnik lotniczy z **paliwowym układem zasilania silnika lotniczego** i urządzenia umożliwiające sterowanie zasilaniem odpowiednią ilością paliwa i powietrza doprowadzanych do komory spalania **silnika lotniczego**.
4. **Schemat konstrukcyjny układu regulacji silnika lotniczego –** rysunek techniczny, w odpowiednim stopniu uproszczenia, **układu regulacji silnika lotniczego** z wyszczególnieniem i opisem wszystkich elementów składowych **układu regulacji silnika lotniczego**.
5. **Schemat funkcjonalny układu regulacji silnika lotniczego –** rysunek techniczny w odpowiednim stopniu uproszczenia **układu regulacji silnika lotniczego** z wyszczególnieniem i opisem zespołów składowych i ich sygnałów wejściowych i wyjściowych oraz ich mian i wartości w stanach ustalonych (np. mały gaz, zakres przelotowy, zakres maksymalny).
6. **Schemat blokowy układu regulacji silnika lotniczego –** rysunek poglądowy przedstawiający zespoły **układu regulacji silnika lotniczego** w postaci jednakowych bloków (prostokątów) oraz bloków sumacyjnych i informacyjnych odpowiednio połączonych sygnałami w postaci wektorów o różnej długości (wynikającej z układu rysunku), które nie mają związku z wartością sygnału.
7. **Regulator silnika lotniczego –** podstawowy zespół **układu regulacji silnika lotniczego**, do którego wprowadzana jest wartość zadana i który zgodnie z konstrukcyjnie założonym algorytmem sterowania wypracowuje odpowiedni sygnał sterujący oddziałujący na zmianę natężenia przepływu paliwa, a także powietrza dostarczanych do komory spalania **silnika lotniczego**.
8. **Korekcja układu regulacji silnika lotniczego –** elementy techniczne wprowadzone do toru głównego i sprzężenia zwrotnego **układu regulacji silnika lotniczego** w celu poprawienia jego jakości statycznej i dynamicznej. UWAGA: W przypadku silników lotniczych elementy te najczęściej projektowane są jako dodatkowe sprzężenie zwrotne regulatora: sztywne (proporcjonalne), elastyczne (różniczkujące) lub adaptacyjne (izodromowe).

9. **Identyfikacja silnika lotniczego –** wyznaczenie transmitancji i jej parametrów za pomocą komputerowego programu jednoznacznie opisanego przez producenta.
10. **Wrażliwość układu regulacji silnika lotniczego –** czułość działania (funkcjonowania) **układu regulacji silnika lotniczego** na zmiany parametrów obiektu i nastaw regulacji, a także korektora.
11. **Monitorowanie układu regulacji silnika lotniczego –** ciągłe pozyskiwanie, gromadzenie i przetwarzanie informacji o relacjach między sygnałami automatyki oraz informowanie użytkownika o aktualnym stanie działania **układu regulacji silnika lotniczego**, za pomocą specjalnych układów służących do ostrzegania użytkownika, a także układów do udzielania użytkownikowi instrukcji i rad w celu uzyskania poprawności działania podczas wystąpienia stanów awaryjnych **układu regulacji silnika lotniczego**.
12. **Wymagania regulacji silnika lotniczego –** ilościowy i jakościowy opis cech, jakie powinien mieć **układ regulacji silnika lotniczego**, środki do regulacji, a także podstawowe obowiązki i wymagania stawiane obsłudze technicznej **silnika lotniczego**.
13. **Procedura regulacyjna –** uporządkowane działania ukierunkowane na rozpoznanie stanu działania **układu regulacji silnika lotniczego** i doprowadzenia go do stanu wymaganego. UWAGA: Procedura regulacyjna jest częścią składową procedur obsługowych.

1.3.2.2. Opis układu regulacji silnika lotniczego wynikający z podstaw i zasad automatyki

Ogólne wymagania dotyczące opisu układów regulacji silników lotniczych wynikają z podstaw i zasad automatyki [1, 7, 10, 12, 20]. Układ regulacji silnika lotniczego powinien być w każdej instrukcji obsługi silnika lotniczego dodatkowo wyczerpująco opisany zgodnie z zasadami automatyki. Opis budowy układu powinien zawierać:

- schemat konstrukcyjny układu regulacji silnika lotniczego,
- schemat funkcjonalny układu regulacji silnika lotniczego,
- schemat blokowy układu regulacji silnika lotniczego,
- aparaturę kontrolno-pomiarową sygnałów automatyki układu regulacji silnika lotniczego,
- automatyczne i komputerowe układy rejestrujące sygnały automatyki.

Jakość działania układu regulacji silnika lotniczego powinna być opisana za pomocą zdeterminowanych relacji między sygnałami wyznaczonymi z modeli matematycznych. Opis jakości działania powinien zawierać:

- przebiegi przejściowe sygnałów wyszczególnionych na schemacie blokowym układu regulacji silnika lotniczego,
- wartości sygnałów w charakterystycznych punktach pracy układu regulacji silnika lotniczego,
- modele matematyczne (transmitancje) elementów składowych układu regulacji silnika lotniczego wyszczególnionych na jego schemacie blokowym i całego układu regulacji silnika lotniczego z wyznaczonymi metodami identyfikacji statycznej i dynamicznej,
- tablice wartości współczynników wzmocnienia i stałych czasowych wynikających z identyfikacji elementów układu i układu,
- charakterystyki statyczne elementów składowych i układu regulacji silnika lotniczego,
- odpowiedzi skokowe układu i wybranych fragmentów układu regulacji silnika lotniczego,
- charakterystyki amplitudowo-fazowe zamkniętego i otwartego układu regulacji silnika lotniczego.

1.3.2.3. Podstawowe elementy składowe układu regulacji silnika lotniczego [1, 12, 20, 22]

1. Opis silnika lotniczego

Silnik lotniczy należy dokładnie opisać zgodnie z zasadami automatyki. Opis ten powinien zawierać:

- sygnały wejściowe i wyjściowe silnika lotniczego jako wielowymiarowego obiektu regulacji, ich miana i wartości,
- macierzowe transmitancje silnika lotniczego (układy równań różniczkowych liniowych i nieliniowych przedstawiające relacje między poszczególnymi sygnałami, charakterystyki statyczne, odpowiedzi skokowe i charakterystyki amplitudowo-fazowe silnika lotniczego jako wielowymiarowego obiektu regulacji,
- zakresy pracy silnika lotniczego wynikające z charakterystyki statycznej,
- wykaz typowych uszkodzeń silnika lotniczego i technik ich identyfikacji.

2. Opis regulatora silnika lotniczego

Regulator silnika lotniczego należy opisać zgodnie z zasadami automatyki. Opis ten powinien zawierać:

- wybór algorytmu regulacji (typu regulatora) dla jednoznacznie ustalonych zakresów statecznej pracy silnika lotniczego,
- układy logiczne sterowania regulatorami silnika lotniczego i ich nastawami,
- wybór algorytmu regulacji dla nieustalonych zakresów niestatecznej pracy silnika lotniczego,
- odpowiedzi skokowe i charakterystyki amplitudowo-fazowe regulatora silnika lotniczego,
- rozwiązanie konstrukcyjne zespołu zasilająco-regulacyjnego,
- wykaz typowych uszkodzeń regulatorów silnika lotniczego i techniki ich identyfikacji.

3. Opis korektorów układu regulacji silnika lotniczego

Elementy korekcyjne należy dodatkowo opisać zgodnie z zasadami automatyki. Opis ten powinien zawierać:

- sygnały wejściowe i wyjściowe elementów korekcyjnych, ich miana i wartości oraz miejsca zabudowania w układzie regulacji silnika lotniczego,
- układy sterowania korektorami i ich nastawami,
- transmitancje elementów, równania różniczkowe opisujące relacje między sygnałami,
- charakterystyki statyczne, odpowiedzi skokowe i charakterystyki amplitudowo-fazowe,
- rozwiązania konstrukcyjne korektorów i ich połączenie z układem regulacji silnika lotniczego.

4. Opis osprzętu układu regulacji i zasilania silnika lotniczego

Osprzęt układu regulacji i zasilania silnika lotniczego należy dodatkowo opisać zgodnie z zasadami automatyki. Opis osprzętu powinien zawierać:

- wykaz elementów osprzętu (filtry, czujniki, przetworniki, elementy wykonawcze, zadajniki) ich rodzaj (pneumatyczne, hydrauliczne, elektroniczne) i dane techniczne,
- wykaz elektrycznych elementów oddziaływania, przełączania, odłączania i ich funkcje w układzie regulacji i zasilania silnika lotniczego oraz elementów zabezpieczających przed stanami awaryjnymi,

- podstawowe charakterystyki i rzeczywiste ich wartości w stanach ustalonych czujników, filtrów i przetworników i innych elementów osprzętu,
- rozwiązania konstrukcyjne elementów osprzętu i ich połączenie z innymi elementami układu regulacji silnika lotniczego,
- wykaz typowych uszkodzeń osprzętu i techniki ich identyfikacji,
- diagnostyka i obsługa elementów osprzętu układu automatycznej regulacji silnika lotniczego.

5. Opis punktów regulacyjnych układu automatycznej regulacji silnika lotniczego

Opis punktów regulacyjnych powinien zawierać:

- jednoznacznie i trwale oznakowane punkty regulacyjne urządzeń (agregatów) układu regulacji silnika lotniczego,
- rozmieszczenie punktów regulacyjnych na schemacie blokowym i schemacie funkcjonalnym układu automatycznej regulacji silnika lotniczego,
- dokładny funkcjonalny opis punktów regulacyjnych w aspekcie zasad automatyki, należy podać, gdzie i w jaki sposób oddziałuje się na poszczególne elementy składowe układu regulacyjnego i jego nastawy,
- opis zabezpieczeń przed samoczynnym rozregulowaniem się układu regulacji silnika lotniczego (przed samoczynną zmianą wartości nastaw urządzeń regulacyjnych),
- wykaz typowych przyczyn samoczynnego rozregulowania się silnika lotniczego.

1.3.2.4. Środki do realizacji technik (działań) regulacyjnych silnika lotniczego

1. Oprzyrządowanie technik regulacyjnych silnika lotniczego

Producent powinien zapewnić pełny zestaw oprzyrządowania (środków przeznaczonych do realizacji wszystkich czynności obsługowych) danego typu silnika lotniczego.

Oprzyrządowanie technik regulacji silnika lotniczego obejmuje:

- narzędzia obsługowe – bezpośrednie środki wykonania czynności regulacyjnych, kontrolnych (np. wkrętaki, klucze, szczelinomierze),

- przybory pomiarowe – urządzenia ułatwiające pomiar (uchwyty, statywy, lupy, podzielnice),
- czujniki – proste elementy przetwarzające wielkość mierzoną na inną przystępną wielkość (np. rurka Bourdona, rurka Pitota, tachometr),
- przetworniki – element do przetwarzania sygnałów jednego rodzaju na inny rodzaj (termopara); korektory – elementy do poprawiania charakterystyk dynamicznych układów pomiarowych,
- układ pomiarowy – odpowiednio połączone elementy (czujnik, przetwornik, korektor) do wiernego odtworzenia wielkości mierzonej,
- przyrządy pomiarowe – urządzenia techniczne ściśle dostosowane do bezpośredniego lub pośredniego wykonania pomiaru (system nadmiernych drgań łopatek, analizator spalin),
- aparatura pomiarowa – zespoły środków technicznych, wzorców miar, sprawdzianów, przyborów, mierników (stanowiska kontrolne i diagnostyczne, zestawy kontrolne),
- sygnalizatory stanów awaryjnych,
- rejestratory sygnałów automatyki,
- polowe komputery z oprogramowaniem,
- gniazda do podłączenia aparatury pomiarowej i inne punkty pomiarowe.

2. Przeznaczenie oprzyrządowania (narzędzi i przyborów pomiarowych)

Oprzyrządowanie technik regulacji silnika lotniczego powinno zapewnić:

- pomiar sygnałów automatyki koniecznych do kontroli działania silnika lotniczego i jego układu regulacji silnika lotniczego podczas próby naziemnej silnika lotniczego,
- rejestracje sygnałów automatyki w tym bez wyjątku: n – prędkość obrotowa, t – temperatura za turbiną, P2 – ciśnienie za sprężarką, pw – ciśnienie za pompą-regulatorem podczas próby naziemnej silnika lotniczego i podczas lotu wojskowego statku powietrznego,
- sygnalizację stanów awaryjnych działania silnika lotniczego i jego układu regulacji silnika lotniczego.

3. Wymagania dotyczące klasy pomiaru układów pomiarowych

Ocena klasy pomiaru oprzyrządowania powinna obejmować:

- charakterystyki statyczne czujników, mierników, narzędzi pomiarowych,
- modele matematyczne elementów oprzyrządowania technik regulacji układów regulacji silnika lotniczego (czujników, przetworników, korektorów i układów pomiarowych),
- charakterystyki dynamiczne: odpowiedź skokową (pozwala ocenić stopień zgodności odpowiedzi z wymuszeniem) i charakterystykę amplitudowo-fazową (pozwala ocenić pasmo przenoszenia sygnałów harmonicznych).

4. Warunki eksploatacji narzędzi pomiarowych

Należy określić (producent, zakłady remontowe) warunki prawidłowego stosowania narzędzi pomiarowych i obsługowych podczas realizacji technik regulacji silnika lotniczego. Warunki te obejmują:

- instrukcje dotyczące realizacji czynności regulacyjnych, pomiarowych i obsługowych,
- wymogi odnośnie do zasad regulacji i obsług silnika lotniczego,
- wytyczne dotyczące sprawdzania (przed każdym użyciem środka), skalowania (okresowo, zgodnie z wewnętrznymi przepisami) i legalizacji (zgodnie z przepisami krajowymi) narzędzi pomiarowych,
- zalecenia z zakresu oceny prawidłowego stanu technicznego narzędzi obsługowych (należy podać typowe stany niezdatności narzędzi obsługowych),
- zastrzeżenia, wg których narzędzia obsługowe mogą być wykorzystywane do wykonania tylko tych czynności, do których są przeznaczone,
- warunki napraw urządzeń pomiarowych i obsługowych, naprawa powinna być wykonana przez specjalizowane firmy wskazane przez producenta lub inne zakłady (instytucje) posiadające odpowiednią akredytację,
- kwalifikacje personelu technicznego wykonującego regulację silnika lotniczego,
- odporność i nieodporność narzędzi pomiarowych na zakłócenia zewnętrzne,
- wymagania niezawodności regulacji niezależnie od czasu pracy narzędzi pomiarowych,
- zabezpieczenia przed uszkodzeniami mechanicznymi, zabrudzeniem, zamoczeniem i przegrzaniem.

1.3.2.5. Elektroniczne wspomaganie procesu regulacji silnika lotniczego

Producent powinien zapewnić lub wskazać pełny zestaw elektronicznych środków do skutecznego wspomagania procesu regulacji silnika lotniczego. Środki te powinny obejmować:

- analogi elektryczne układu regulacji silnika lotniczego i jego elementów składowych,
- schematy maszynowe (komputerowe) układu regulacji silnika lotniczego,
- programy komputerowe zastosowane do identyfikacji i badania układu regulacji silnika lotniczego,
- korelatory sygnałów (zrealizowane techniką komputerową),
- analizatory sygnałów (zrealizowane techniką komputerową).

Podczas eksploatacji silnika lotniczego informacja o stanie technicznym i niezawodności oraz regulacji i jakości jego działania powinna być gromadzona, przechowywana oraz analizowania i przetwarzana w celu zapewnienia optymalnej eksploatacji układu regulacji silnika lotniczego.
Baza danych powinna obejmować:

- elektroniczną bazę danych przebiegów wynikających z działania układu regulacji silnika lotniczego uzyskanych podczas kolejnych standardowych prób silnika lotniczego w celu określenia wskaźników jakości działania układu i wymaganych nastaw regulatora tego układu,
- elektroniczną bazę danych wskaźników jakości i parametrów wynikających z działania układu podczas kolejnych standardowych prób silnika lotniczego w celu określenia stanu technicznego silnika lotniczego i układu regulacji silnika lotniczego,
- elektroniczną bazę danych o zaistniałych uszkodzeniach i innych szczególnych przypadkach działania układu podczas użytkowania i prób silnika lotniczego w celu weryfikacji założonych charakterystyk silnika lotniczego i układu regulacji silnika lotniczego.

Baza wiedzy powinna obejmować:

- modele dynamiczne, modele diagnostyczne i niezawodnościowe silnika i zespołów silnika,
- wartości wskaźników jakości regulacji (zbiór ograniczeń dla pracy silnika),

– zasady (reguły) wnioskowania w zakresie oceny regulacji silnika lotniczego.

1.3.3. Klasyfikowanie regulatorów silników lotniczych

1. Rodzaje regulatorów silników lotniczych

Ze względu na realizację konstrukcyjną wyróżnia się następujące rodzaje regulatorów silników lotniczych [7, 12, 20, 22]:

– elektroniczny,
– pneumatyczny,
– hydrauliczny,
– elektrohydrauliczny.

2. Typy regulatorów silników lotniczych

Niżej podane są przykłady regulatorów silników lotniczych:

Regulatory klasyczne:

a) I – całkujący,
b) PI – proporcjonalno-całkujący,
c) PID – proporcjonalno-całkująco-różniczkujący.

Regulatory klasyczne o zmiennej strukturze:

a) I–P – całkująco-proporcjonalny,
b) PI–D – proporcjonalno-całkująco-różniczkujący o zmiennej strukturze,
c) I–PD – proporcjonalno-całkująco-różniczkujący o zmiennej strukturze.

Regulatory predykcyjne do regulacji obiektów z dużym opóźnieniem lub inercją:

a) pI – predykcyjny całkujący,
b) pPI – predykcyjny proporcjonalno-całkujący,
c) pPID – predykcyjny proporcjonalno-całkująco-różniczkujący.

Regulatory rozmyte do regulacji w stanach nieustalonych:

a) rI – rozmyty całkujący,
b) rPI – rozmyty proporcjonalno-całkujący,
c) rPID – rozmyty proporcjonalno-całkująco-różniczkujący.

1.4. Niezawodność w systemie eksploatacji obiektów

Obiekt techniczny powinien być niezawodny, czyli zdatny do spełnienia postawionych mu wymagań w określonych warunkach użytkowania [3, 5, 9, 30, 31]. Własności obiektu określające jego przydatność w zadanym zastosowaniu można opisać za pomocą mierzalnych funkcji jego cech istotnych. Zaistnienie zmiany wartości cech istotnych obiektu technicznego powoduje zmianę jego stanu niezawodnościowego. Całkowita lub częściowa utrata zdatności, zmiana istotnych właściwości obiektu technicznego to zjawisko, które zgodnie z Polską Normą określa się terminem „uszkodzenie".

Wszystkie uszkodzenia są zdarzeniami losowymi. Uszkodzenia mogą charakteryzować się gwałtownymi (nagłymi) zmianami zasadniczych parametrów pod wpływem różnych losowych przyczyn związanych z wewnętrznymi defektami elementów, niewłaściwymi zmianami warunków eksploatacyjnych lub błędami obsługi. Przy uszkodzeniach powolnych, stopniowych obserwuje się stopniową, płynną i powolną zmianę parametrów, co jest wynikiem starzeniowego zużywania się poszczególnych elementów, jak i całego układu. Inne spotykane uszkodzenia charakteryzują się tym, że mogą samoczynnie ustąpić bez ingerencji obsługi, po zniknięciu przyczyny, która je wywołuje. Przyczynami tego typu uszkodzeń są często niestandardowe warunki eksploatacji [29, 30].

Liczba uszkodzeń i ich występowanie w czasie są bezwarunkową podstawą do wyznaczenia wskaźników niezawodności obiektu. Należy tu jednak zauważyć, że uszkodzenie może być już takim niepożądanym stanem, w którym cecha istotna właściwości obiektu U na stałe przekroczy wartości graniczne u_g lub u_d, a obiekt ze stanu zdatności przejdzie już trwale w stan niezdatności.

Dlatego istnieje potrzeba prognozowania tego typu uszkodzeń, co z kolei wymaga ciągłej obserwacji zmian często niedostępnej mierzalnej istotnej właściwości obiektu.

Stanie się to możliwe po wykorzystaniu następujących zasad diagnostyki:

1. Każda zmiana cechy stanu technicznego generuje mierzalne i dostępne sygnały diagnostyczne.
2. Sygnały diagnostyczne pozwalają pośrednio obserwować niedostępne istotne cechy stanu technicznego.

3. Sygnały diagnostyczne pozwalają prognozować osiągnięcie przez istotną cechę stanu wartości granicznych u_g lub u_d.

Prognozowane zgodnie z zasadami diagnostyki potencjalnego uszkodzenia pozwolą weryfikować w procesie eksploatacji wymagane charakterystyki niezawodnościowe przed wystąpieniem realnych uszkodzeń [15, 21, 23].

1.5. Podsumowanie

Można stwierdzić, że zmiana stanu technicznego (parametrów stanu) obiektu (rys. 1.4 i 1.5) spowoduje zmianę jego stanu działania (zmieniają się wskaźniki jakości działania). Ponieważ wymaga się, aby jakość działania była zawsze właściwa i stała, w takiej sytuacji należy doregulować (dostroić) nastawy urządzenia sterującego do zaistniałych zmian obiektu (rys. 1.4 i 1.5). Zatem zawsze wymagana zmiana nastaw urządzenia sterującego (wykonana podczas obsługi obiektu) świadczy także o jego zmianie stanu technicznego. Należy domniemywać, że podczas eksploatacji obiektu technicznego może pojawić się taka sytuacja, gdy dobór nastaw urządzenia sterującego do nadmiernie zużytego i uszkodzonego obiektu technicznego będzie trudny. Ten fakt (najlepiej gdy będzie prognozowany) staje się podstawą do predykcji uszkodzeń i stąd charakterystyk niezawodnościowych obiektu.

Reasumując, można wysnuć wniosek, że regulacja, diagnostyka i niezawodność obiektu technicznego są w ścisłym związku, który może być optymalnie zrealizowany w ramach cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego.

1.6. Spis literatury

1. Antoniewicz J.: *Automatyka*, WNT, Warszawa 1973.
2. Ashby R.W.: *Wstęp do cybernetyki*, PWN, Warszawa 1963.
3. Bobrowski D.: *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1985.
4. Boliński B., Stelmaszczyk Z.: *Eksploatacja silników turbinowych*, WKŁ, Warszawa 1981.

5. Borgoń J., Jaźwiński J., Klimaszewski S., Żmudziński Z., Żurek J.: *Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów*, Wyd. ASKON, Warszawa 1998.
6. Borowczyk H., Lindstedt P. i zespół: *Model zintegrowanego systemu diagnostycznego płatowca i zespołu napędowego statków powietrznych*, Opracowanie ITWL Nr 12020/I, ITWL, Warszawa 1997.
7. Brzózka J.: *Regulatory i układy automatyki*, MIKOM, Warszawa 2004.
8. Lerner A. J.: *Zarys cybernetyki*, WNT, Warszawa 1971.
9. Lewitowicz J., Kustroń K.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, t. 2, Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
10. Lindstedt P.: *Funkcje wrażliwości w procesie organizacji badań diagnostycznych obiektów technicznych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn", nr 12, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2004.
11. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa 2002.
12. Lindstedt P.: *Praktyczna regulacja maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wydawnictwo Naukowe ITWL, Warszawa 2010.
13. Lindstedt P.: *Reliability and its relation to regulation and diagnostics the machinery exploitation systems*, "Journal of KONBIN", Vol. 1 No. 2/2006, Wyd. ITWL, Warszawa 2006.
14. Lindstedt P., Błachnio J.: *Automatyka i diagnostyka podstawą systemu obsługiwania maszyn*, Materiały V Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej DPP'01, Wyd. Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2001.
15. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: *Sterowanie procesem użytkowania turbinowego silnika śmigłowcowego na podstawie kompleksowych sygnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia*, Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji AIRDIAG'05, Wyd. ITWL, Warszawa 2005.
16. Lindstedt P., Sabak R.: *Nowe techniki w diagnostyce lotniczych silników turbinowych*, Materiały Seminarium Wydz. MEiL PW, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
17. Lindstedt P., Szczepanik R.: *Regulacja i diagnostyka w obsłudze technicznej silników lotniczych*, VII Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'01, Wyd. ITWL, Warszawa 2001.
18. Mynarski S.: *Elementy teorii systemów i cybernetyki*, PWN, Warszawa 1974.
19. Paton R., Frank P., Clark R.: *Fault diagnostic in dynamic systems. Theory and applications*, Cambridge University Press, 1989.
20. Pełczewski W.: *Teoria sterowania*, WNT, Warszawa 1980.
21. Sotskow B.S.: *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*, WNT, Warszawa 1973.
22. Staniszewski R.: *Sterowanie zespołów napędowych*, WKŁ, Warszawa 1980.

23. Szczepanik R., Lindstedt P., Borowczyk H.: *Diagnostyka techniczna w systemie utrzymywania zdatności silników lotniczych*, „Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej", tom 5, Wyd. ITWL, Warszawa.
24. Wiener N.: *Cybernetyka czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie*, PWN, Warszawa 1971.
25. Woropay M.: *System eksploatacji jako hierarchiczny system biotechniczny*, „Inżynieria Systemów Bioagrotechnicznych. Zeszyty Naukowe", Nr 3, Politechnika Warszawska, Warszawa 1993.
26. Woropay M.: *Diagnostyka a niezawodność systemów technicznych*, „Postępy Cybernetyki", Ossolineum, Zeszyt 2/1983.
27. Woropay M.: *Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn*, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1996 (praca zbiorowa).
28. Zboiński M., Lindstedt P., Deliś M.: *Opportunities of evaluation diagnostic test results of roller bearings from signals correlation of bearin and its environment*, "Journal of KONBIN", No. 2(22) 2012, Warszawa 2012.
29. Zboiński M., Lindstedt P., Kotlarz I.: *Stałe i aktualizowane statystyczne tribologiczne progi diagnostyczne i ich znaczenie w procesie bieżącej oceny stanu technicznego układu łożyskowania silnika lotniczego*, „Journal of KONBIN" No. 1(17) 2011, Warszawa 2011.
30. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*, Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996.
31. Żurek J.: *Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie*, „Przegląd WLOP", 12/2001, Wyd. EMPA, Poznań 2001.

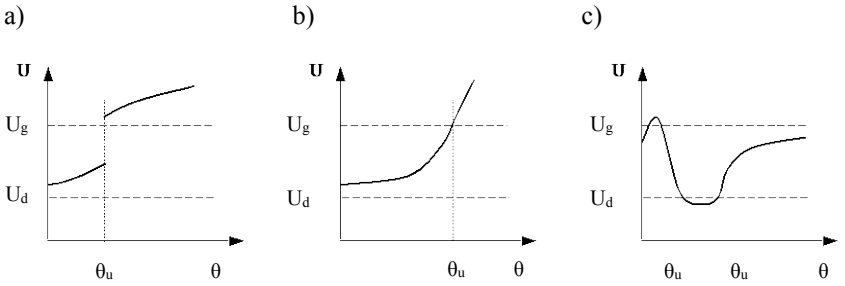
2

USZKODZENIA JAKO BAZA CHARAKTERYSTYK NIEZAWODNOŚCIOWYCH

2.1. Rodzaje uszkodzeń

W badaniach niezawodnościowych dużą rolę odgrywają wszechstronne jakościowe i ilościowe badania nad powstawaniem różnych przypadkowych uszkodzeń. Zgodnie z PN, uszkodzenie jest to mierzalne zdarzenie losowe, zmieniające cechę stanu działania lub stanu technicznego obiektu, oznaczające przejście obiektu ze stanu zdatności do stanu niezdatności, przy czym także zgodnie z PN, stan zdatności rozumiany jest tu jako zdolność obiektu do prawidłowego wykonania wyznaczonej pracy w określonym czasie. Zaistnienie uszkodzenia, czyli przejście ze stanu zdatności do stanu niezdatności obiektu, powoduje zmianę jego stanu niezawodnościowego ilościowo określanego za pomocą wskaźników niezawodnościowych. W procesie określania niezawodności eksploatowanego obiektu technicznego pod uwagę bierze się różne typy uszkodzeń: katastroficzne (całkowite), parametryczne (starzeniowe, niecałkowite) i przemijające (chwilowe) – rys. 2.1 [1, 3, 15, 16, 20].

Uszkodzenia te mają różną postać i różny mechanizm powstawania, dlatego też w badaniach niezawodnościowych eksploatowanego obiektu ich identyfikacja jest problemem podstawowym. Rezultatem przeprowadzonej identyfikacji jest zakwalifikowanie wszystkich zdarzeń losowych zmieniających istotną cechę stanu technicznego (lub systemu działania) do tylko jednego z wyżej wymienionych typów uszkodzeń (katastroficznych, parametrycznych lub chwilowych). Stąd zaistniała potrzeba ścisłego zdefiniowania poszczególnych przypadków uszkodzeń.



Rys. 2.1. Przebieg zmian wartości mierzalnych cech istotnych *U* podczas eksploatacji w czasie θ; a) katastroficznych, b) starzeniowych (parametrycznych), c) przemijających (chwilowych); θ – czas uszkodzenia obiektu technicznego, U_g, U_d – górna i dolna progowa wartość cechy [9, 13, 23]

Uszkodzenia katastroficzne (całkowite) są to nagłe zdarzenia prowadzące do katastrofy, czyli całkowitej niezdatności obiektu technicznego. Obiekt, w którym zaistniało uszkodzenie katastroficzne, ulega zniszczeniu, a w mniej groźnych przypadkach podlega kasacji lub wymaga remontu polegającego na wymianie uszkodzonych elementów na nowe. W procesie eksploatacji różnych obiektów technicznych, spotyka się stosunkowo nieliczne uszkodzenia katastroficzne:

- urwanie łopatki sprężarki,
- ukręcenie wału łączącego turbinę ze sprężarką,
- nadtopienie łopatki turbiny wtryskiwacza komory spalania,
- zniszczenie łożyska (zatarcie),
- złamanie elementu wytrzymałościowego,
- zniszczenie powłoki żaroodpornej,
- pęknięcie opony itd.

Uszkodzenia te są jednoznaczne i oczywiste, dlatego łatwe do identyfikacji. Bezwzględnie muszą być uwzględnione w procesie wyznaczania wskaźników niezawodności.

Uszkodzenie parametryczne (niecałkowite, starzeniowe, degradacyjne) jest to zdarzenie, które stopniowo prowadzi obiekt do stanu niezdatności. Wiele terminów, którymi określa się ten przypadek uszkodzeń, jasno określa jego charakter. Jest to uszkodzenie, które w danej chwili eksploatacji jeszcze nie powoduje niezdatności obiektu. Jest jedynie przesłanką do zaistnienia stanu niezdatności w przyszłości. Mówi się, że obiekt z tym uszkodzeniem jest w stanie zagrożenia, które może być usunięte

podczas prac obsługowych. W procesie eksploatacji powstaje dość duży zbiór uszkodzeń parametrycznych:

- małe pęknięcia,
- wgniecenia,
- zbicie łopatki,
- małe wżery korozyjne,
- małe ubytki erozyjne (które mogą być usunięte podczas tzw. zaczyszczania),
- zwiększenie tarcia układu łożyskowania (które może być usunięte podczas np. wymiany oleju),
- za mała wartość ciśnienia w instalacji hydraulicznej, paliwowej (która może być wyrównana zmianą nastawy układu regulacji).

Identyfikacja uszkodzenia parametrycznego jest trudna. Wymaga standardowych i specjalnych układów pomiarowych, stosowanych do badań kontrolnych (ocena stanu działania układu) i do badań diagnostycznych (ocena stanu technicznego układu) [7, 8, 16]. Uszkodzenia te powinny być uwzględniane w procesie obliczania wskaźników niezawodności.

Uszkodzenie przemijające (chwilowe) jest to zdarzenie, które losowo pojawia się i po pewnym czasie samoczynnie ustępuje, nie pozostawiając jednoznacznych oznak jego zaistnienia. Jest to uszkodzenie, które w danej chwili nie powoduje utraty zdatności obiektu. W procesie eksploatacji często występują różne uszkodzenia przemijające:

- chwilowe przekroczenie dopuszczalnej temperatury,
- chwilowe przekroczenie dopuszczalnej temperatury oleju układu smarowania lub układu chłodzenia,
- niestabilne ciśnienie paliwa,
- przerwa w zasilaniu paliwem,
- niestateczna praca sprężarki silnika,
- chwilowe przeregulowanie maksymalnej prędkości obrotowej,
- przeciążenie konstrukcji,
- chwilowe zwiększenie poziomu drgań itd.

Uszkodzenia te albo nie wymagają żadnych prac obsługowych, albo wymagają tylko nieznacznej zmiany nastaw układów regulacyjnych. Identyfikacja uszkodzeń przemijających jest bardzo trudna. Wymaga badań kontrolnych i diagnostycznych. Także i te uszkodzenia (o ile to możliwe) powinny być wykorzystane do obliczania wskaźników niezawodności obiektu.

2.2. Identyfikacja uszkodzeń metodami bezpośrednimi (organoleptycznymi)

Różna natura fizyczna uszkodzeń (katastroficznych, parametrycznych i chwilowych) sprawia, że ich lokalizacja i identyfikacja jest złożona i często niejednoznaczna.

Uszkodzenia katastroficzne o liczności $m_a(t)$ (w danym przypadku czas t jest czasem bergsonowskim θ) pojawiają się losowo i przeważnie dotyczą dużych zbiorów obiektów o liczności n. Są informacją bardzo kosztowną, bo wynikającą bardzo często ze zniszczenia elementu lub całego obiektu. Dostrzegane są bezpośrednio (organoleptycznie) przez użytkownika lub obsługę techniczną. Dlatego do obliczania charakterystyk niezawodnościowych wykorzystuje się, o ile to możliwe, uszkodzenia katastroficzne prognozowane (z procesu diagnozowania).

Uszkodzenia parametryczne (niecałkowite, starzeniowe, degradacyjne) o liczności $m_b(t)$ mogą pojawić się podczas użytkowania maszyny (pompaż). Są dość dobrze dostrzegalne, a stąd mogą być identyfikowane przez użytkownika i odpowiednim działaniem likwidowane (pompaż, drgania). Ich identyfikacja może też być dokonana podczas diagnozowania maszyny. System diagnostyki (rys. 1.2, 1.3) jest głównym źródłem informacji, z którego otrzymuje się liczbę uszkodzeń parametrycznych $m_b(t)$. Cechą charakterystyczną tych uszkodzeń jest fakt, że przeważnie powstają one przed uszkodzeniami katastroficznymi [8, 13, 15, 21, 23].

Uszkodzenia przemijające (chwilowe) $m_c(t)$, pojawiają się tylko podczas działania maszyny i są prawie niedostrzegane przez użytkownika (pilota), a także obsługę (mechanika). Przeważnie są identyfikowane podczas czynności regulacyjnych wykonywanych z wykorzystaniem urządzeń rejestrujących. Głównym źródłem, z którego otrzymuje się liczbę uszkodzeń przemijających $m_c(t)$ jest system regulacji (rys. 1.2). Cechą charakterystyczną tych uszkodzeń jest fakt, że zawsze pojawiają się przed uszkodzeniami katastroficznymi i parametrycznymi.

2.3. Identyfikacja uszkodzeń parametrycznych i chwilowych z równań interakcji

2.3.1. Identyfikacja uszkodzeń bez uwzględniania warunków początkowych obiektu

Istotą sposobu trudnych do identyfikacji uszkodzeń parametrycznych i chwilowych jest to, że każdy obiekt techniczny w otoczeniu opisuje się za pomocą dwóch skorelowanych równań stanu (równań interakcji) [4, 5, 10, 14]:

$$\frac{dD_K}{d\theta} = a_{R_b} D_K + b_{R_b} U \tag{2.1}$$

$$\frac{dU}{d\theta} = a_{R_c} U + b_{R_c} D_K \tag{2.2}$$

gdzie: U – wektor sygnałów automatyki wynikających z działania obiektu technicznego, D_K – wektor sygnałów diagnostycznych związanych ze stanem technicznym obiektu, a_{Rb} – parametr stanu technicznego obiektu, b_{Rb} – parametr oddziaływania stanu technicznego na możliwości regulacyjne, a_{Rc} – parametr stanu regulacji (działania), b_{Rc} – parametr oddziaływania stanu użytkowego na stan techniczny. Równania te bazują na oczywistym spostrzeżeniu, że wartość użytkowa obiektu U zależy od stanu technicznego (zużycia fizycznego) D_K, a stan techniczny od intensywności użytkowania, tzn. że stan techniczny D_K jest otoczeniem dla stanu użytkowego U, a stan użytkowy U dla stanu technicznego D_K.

Z równań stanu (2.1 i 2.2) oblicza się parametry stanu technicznego a_{Rb} i a_{Rc}:

$$a_{R_b} = \frac{\Delta D_K}{\Delta\theta\left(D_K + \hat{a}_{R_b} U\right)} \tag{2.3}$$

$$a_{R_c} = \frac{\Delta U}{\Delta\theta\left(U + \hat{a}_{R_c} D_K\right)} \tag{2.4}$$

gdzie:

$$\hat{a}_{R_b} = -\frac{\sum_{i=1}^{n} D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^{n} U_i^2} \tag{2.5}$$

$$\hat{a}_{R_c} = -\frac{\sum_{i=1}^{n} D_{K_i} U_i}{\sum_{i=1}^{n} D_{K_i}^2} \tag{2.6}$$

Z zależności (2.3 i 2.4) wynika, że w każdej chwili $\theta_i + \Delta\theta$ ($\Delta\theta$ – dostatecznie duże) można obliczyć chwilowe wartości a_{R_b} i a_{R_c}, które są podstawą do ilościowej oceny stanu technicznego i stanu regulacji. Dodatkowo przebiegi ciągów wartości $a_{R_b}(\theta)$ i $a_{R_c}(\theta)$ mogą być podstawą do identyfikacji uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, a stąd charakterystyk niezawodnościowych (przed wystąpieniem uszkodzeń katastroficznych).

Znamienną cechą tego sposobu identyfikacji uszkodzeń jest spostrzeżenie, że odpowiednio duże chwilowe zmiany parametru a_{R_c} mogą być uznane za symptom uszkodzeń przemijających (chwilowych), a odpowiednio duże zmiany parametru a_{R_b} mogą być uznane za symptomy uszkodzeń parametrycznych.

Sposób identyfikacji liczb uszkodzeń *mb(t)* i *mc(t)* jest następujący:

1. Pomiar sygnałów dotyczących użytkowania U_1, U_2, U_3, ... i obliczenie kompleksowego sygnału otoczenia U:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \cdots} \tag{2.7}$$

2. Pomiar sygnałów dotyczących stanu technicznego D_1, D_2, D_3, ... i obliczenie kompleksowego sygnału diagnostycznego D:

$$D_K = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \cdots} \tag{2.8}$$

3. Z równań stanu (2.1 i 2.2) wyznacza się przebiegi ciągów wartości parametrów stanu technicznego a_{R_b} i stanu regulacji a_{R_c}, ich wartości średnich $\bar{x}_{a_{Rb}}$ i $\bar{x}_{a_{Rc}}$ oraz odchyleń standardowych $s_{a_{Rb}}$ i $s_{a_{Rc}}$.

4. Wyznaczenie liczby symptomów uszkodzeń parametrycznych i przemijających $m_b(t)$ i $m_c(t)$ z założenia, że uszkodzenie zaistnieje wtedy, gdy bieżąca wartość parametru a_{R_b} i a_{R_c} jest większa od wyznaczonych wartości progowych $d_{pr\,a_{Rb}}$, $d_{pr\,a_{Rc}}$.

Wyznaczone liczby uszkodzeń są warunkiem koniecznym do wyznaczenia charakterystyk niezawodnościowych dla każdego pojedynczego obiektu. Charakterystyki te mogą być wyznaczone przed pojawieniem się uszkodzenia katastroficznego. W tym przypadku uszkodzenia $m_{R_b}(t)$ i $m_{R_c}(t)$ są prognozą uszkodzeń katastroficznych $m_{R_a}(t)$.

Stąd pojawia się poważny problem wyznaczania progów diagnostycznych $d_{pr\,a_{Rb}}$ i $d_{pr\,a_{Rc}}$ dla parametrów stanu technicznego a_{R_b} i stanu działania a_{R_c}.

2.3.2. Identyfikacja uszkodzeń z uwzględnieniem warunków początkowych

Każdy obiekt techniczny (w zasadzie) swój proces pracy rozpoczyna od pewnych warunków początkowych. Wtedy równania 2.1 i 2.2 przyjmują postać uwzględniającą warunki początkowe.

$$\frac{dD_K}{dt} = a_{R_b} D_K + b_{R_{b1}} U + b_{R_{b0}} \tag{2.9}$$

$$\frac{dU}{dt} = a_{R_c} U + b_{R_{c1}} D_K + b_{R_{c0}} \tag{2.10}$$

gdzie: U – sygnał działania (sygnał użytkowania); D_K – sygnał diagnostyczny pompy; a_{R_c} – parametr stanu użytkowania, który jest zależny przede wszystkim od działania obiektu U i od oddziaływania na tę pracę sygnałów diagnostycznych obiektu D_K; $b_{R_{b1}}$, $b_{R_{c1}}$, $b_{R_{b0}}$, $b_{R_{c0}}$ – parametry oddziaływania sygnałów działania U i diagnostycznych D_K i ich warunków początkowych na stan techniczny lub działania; a_{R_b} – parametr stanu technicznego obiektu, który jest zależny od sygnałów diagnostycznych i sygnałów wynikających z działania otoczenia.

Analogicznie jak w równaniach 2.1 i 2.2 tak i tu oblicza się parametry stanu technicznego a_{R_b} i a_{R_c}:

$$a_{R_b} = \frac{\Delta D_K}{\Delta\theta\left(D_K + \widehat{a_{R_{b1}}}U + a_{R_{b0}}\right)} \tag{2.11}$$

$$a_{R_c} = \frac{\Delta U}{\Delta\theta\left(U + \widehat{a_{R_{c1}}}U + a_{R_{c0}}\right)} \tag{2.12}$$

gdzie:

$$\widehat{a_{R_{b1}}} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} D_{K_i}U_i - \sum_{i=1}^{n} D_{K_i}\sum_{i=1}^{i} U_i}{n\sum_{i=1}^{n} U_i^2 - \sum_{i=1}^{i} U_i \sum_{i=1}^{i} U_i} \tag{2.13}$$

$$\widehat{a_{R_{b0}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{K_i}\sum_{i=1}^{n} U_i^2 - \sum_{i=1}^{n} D_{K_i}U_i\sum_{i=1}^{i} U_i}{n\sum_{i=1}^{n} U_i^2 - \sum_{i=1}^{i} U_i \sum_{i=1}^{i} U_i} \tag{2.14}$$

$$\widehat{a_{R_{c1}}} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} D_{K_i}U_i - \sum_{i=1}^{n} D_{K_i}\sum_{i=1}^{i} U_i}{n\sum_{i=1}^{n} D_{Ki}^2 - \sum_{i=1}^{i} D_{K_i} \sum_{i=1}^{i} D_{K_i}} \tag{2.15}$$

$$\widehat{a_{R_{c0}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i\sum_{i=1}^{n} D_{K_i}^2 - \sum_{i=1}^{n} D_{K_i}U_i\sum_{i=1}^{i} D_{K_i}}{n\sum_{i=1}^{n} U_i^2 - \sum_{i=1}^{i} U_i \sum_{i=1}^{i} U_i} \tag{2.16}$$

Parametr a_{R_b} charakteryzuje stan techniczny obiektu. Jest on zależny od sygnałów diagnostycznych D_K i sygnałów wynikających z działania kierowcy i otoczenia oraz warunków początkowych $\widehat{a_{R_{b0}}}$.

Parametr a_{R_c} charakteryzuje stan działania obiektu. Jest on zależny od sygnałów działania (użytkowych) wynikających z działania obiektu i otoczenia U, sygnałów diagnostycznych D_K i warunków początkowych $\widehat{a_{R_{b0}}}$.

Dalszy sposób analizy i założeń do identyfikacji liczb uszkodzeń jest identyczny jak w przypadku równań stanu bez uwzględnienia warunków początkowych. Także tu podstawowym problemem jest wyznaczenie progów diagnostycznych dla parametrów a_{R_b} i a_{R_c}.

2.4. Sposób wyznaczania liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych

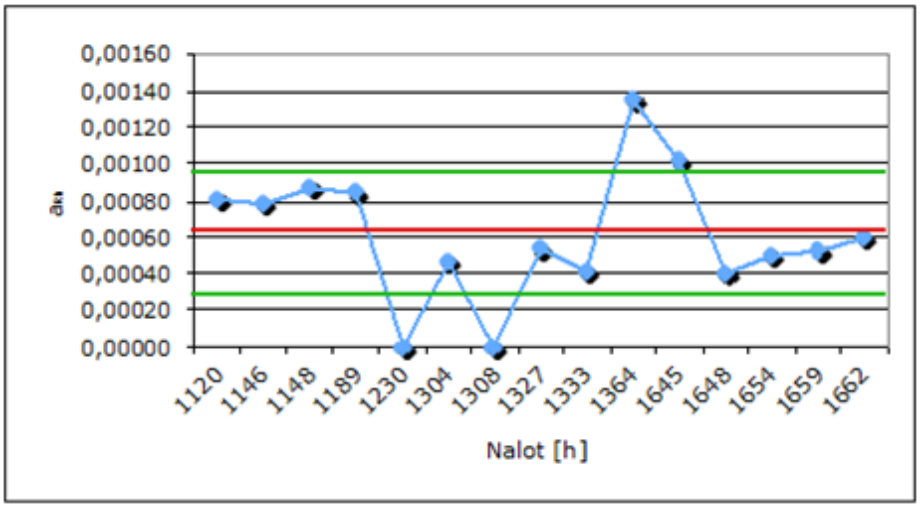
2.4.1. Wyznaczanie liczby uszkodzeń z wykorzystaniem statystycznych progów diagnostycznych dla parametrów stanu działania i stanu technicznego

Wzory 2.3 i 2.4 (bez warunków początkowych) lub wzory 2.11 i 2.12 (z warunkami początkowymi) są podstawą do wyznaczenia chwilowych wartości parametru stanu technicznego a_{R_b} i stanu regulacji (działania) a_{R_c}.

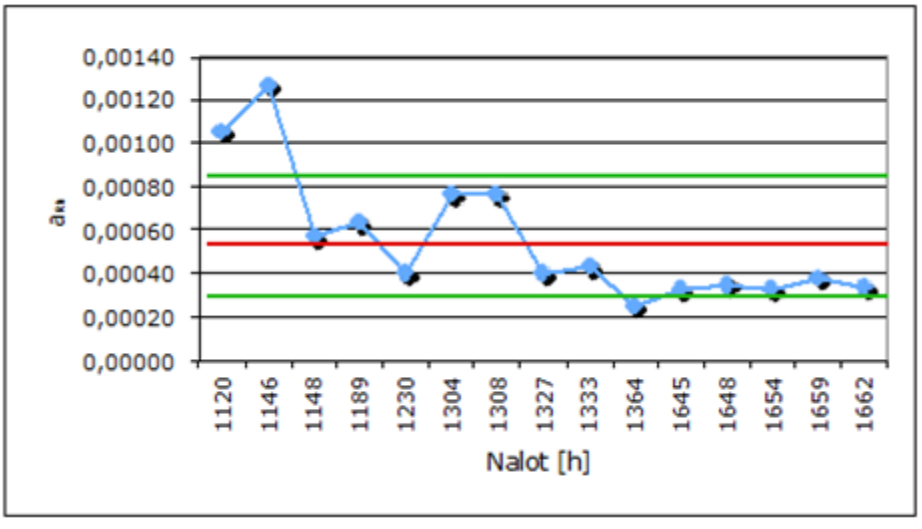
Za istotną zmianę parametrów a_{R_b} i a_{R_c} uznaje się fakt, gdy wartość a_{R_b} lub a_{R_c} osiągnie lub przekroczy próg statystyczny ($d_{pr\,a_{Rb}}$, $d_{pr\,a_{Rc}}$) np. $\bar{x} \pm 0{,}25s$, $\bar{x} \pm 0{,}5s$, $\bar{x} \pm 0{,}75s$ lub $\bar{x} \pm s$, przy czym $\bar{x}$ – średnia wartość a_{R_b} lub a_{R_c} (statystyka), s – odchylenie standardowe (statystyka) a_{R_b} lub a_{R_c} [5, 13, 15, 24]. Liczby przekroczeń $m_b(t)$ i $m_c(t)$ tak przyjętych progów statystycznych pozwalają wyznaczyć uszkodzenia, a następnie charakterystyki niezawodnościowe [14, 15, 16, 21].

Przykład przebiegu parametrów a_{R_b} i a_{R_c} przedstawiono na rys. 2.2. W danym przypadku przyjęto próg statystyczny $\bar{x} \pm s$. Jak widać, z rys. 2.2 a i c zidentyfikować można cztery uszkodzenia parametryczne ($m_b(t)=4$) i cztery chwilowe ($m_c(t)=4$) dla silnika Allison 250 – C20B (prawego), a z rys. 2.2 b i d trzy uszkodzenia parametryczne ($m_b(t)=3$) i sześć chwilowych ($m_c(t)=6$) dla silnika Allison 250 – C20B (lewego) pracujących na tym samym obiekcie (śmigłowcu PZL – KANIA). Różna liczba uszkodzeń pojawiających się w różnym czasie eksploatacji świadczy, że charakterystyki silników pracujących na tym samym obiekcie są różne.

a)

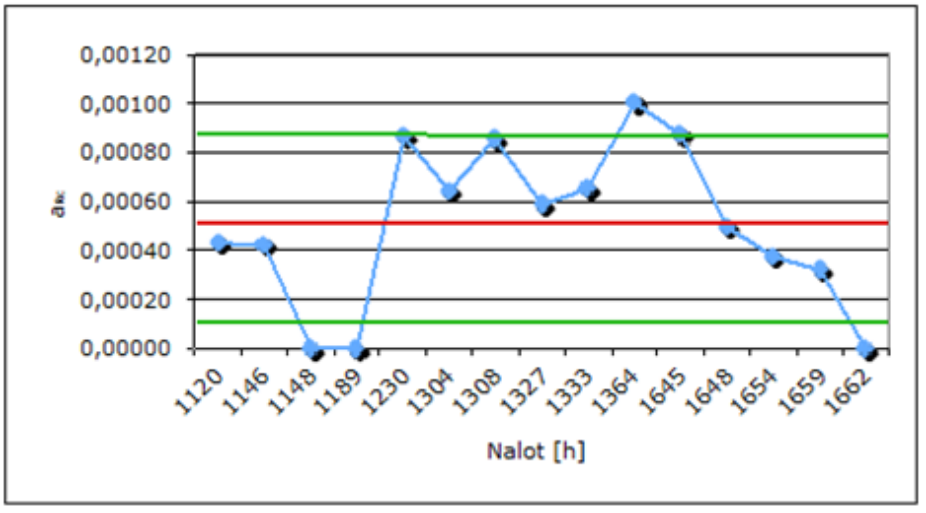


b)

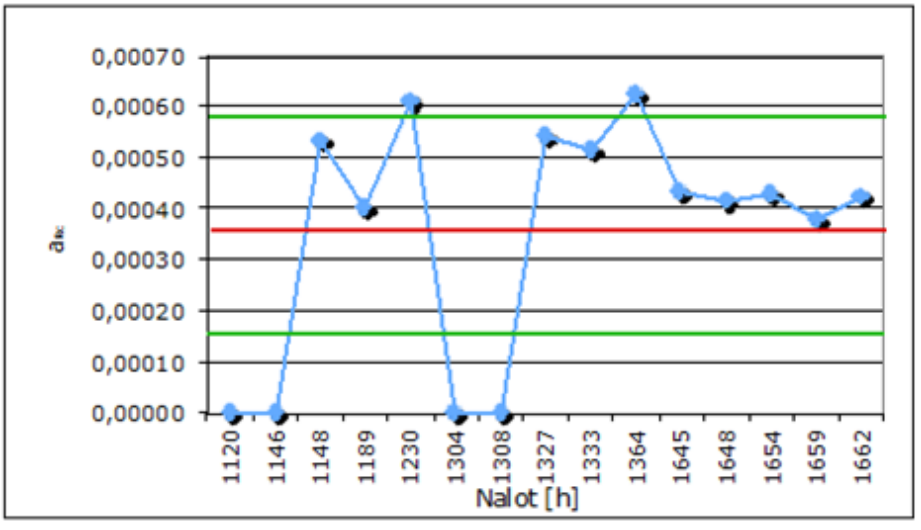


Rys. 2.2 a, b. Liczby przekroczonych progów parametru a_{Rb} charakteryzującego stan techniczny dla silnika Allison 250-C20B: prawego (a) i lewego (b) [22]

c)



d)



Rys. 2.2 c, d. Liczby przekroczonych progów parametru a_{Rc} charakteryzującego stan regulacji dla silnika Allison 250-C20B: prawego (c) i lewego (d) [22]

2.4.2. Wyznaczanie liczby uszkodzeń z wykorzystaniem progów diagnostycznych wynikających z twierdzenia Lindeberga – Levy'ego

Uszkodzenia parametryczne i chwilowe są identyfikowane na podstawie ilościowych relacji między chwilową wartością progową a odpowiadającą jej chwilową wartością dopuszczalną. Chwilowa wartość progowa i chwilowa wartość dopuszczalna mogą być wyznaczane na podstawie twierdzenia Lindeberga – Levy'ego [16, 17, 18].

$$d_{pri}(\theta) = i \cdot x_i + a_i \cdot s_i \cdot \sqrt{i} \tag{2.17}$$

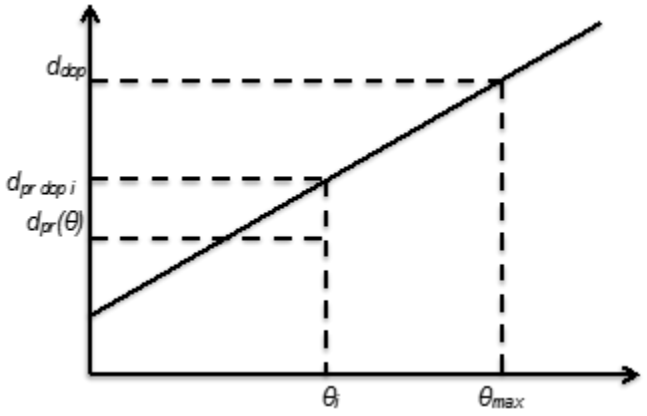
$$d_{dopi} = m \cdot \bar{x}_m + a_i \cdot s_m \cdot \sqrt{m} \tag{2.18}$$

$$d_{pr_{dop\,i}} = \frac{\left(d_{dop} - d_{pr3}\right) \cdot (\theta_i - \theta_3)}{\theta_{max} - \theta_3} + d_{pr3} \tag{2.19}$$

gdzie: $d_{pri}(\theta)$ – próg chwilowy dla parametrów a_{R_b} i a_{R_c}, d_{dop} – wartość dopuszczalna parametrów a_{R_b} i a_{R_c}, $d_{pr_{dopi}}$ – wartość dopuszczalna parametrów a_{R_b} i a_{R_c} dla chwili badania θ_i, $\bar{x}$ – średnia, s – odchylenie standardowe, i – numer kolejnego pomiaru, współczynnik $a_i = \frac{\sum x_i - i\mu_i}{\sigma_i\sqrt{i+2}}$ uwzględniający informację, że zbiór wartości parametrów dąży do rozkładu normalnego, dla którego parametr średniej $\mu_i = \frac{\sum x_i}{i+2}$, a parametr odchylenia standardowego $\sigma_i = \frac{5}{4}\mu_i$, $m = \frac{\theta_{max}}{\Delta\theta_{śr}}$ (rys. 2.3) [11,12, 19].

Dla każdego czasu eksploatacji obiektu technicznego θ_i wyznacza się dopuszczalną wartość progową sygnału diagnostycznego $d_{prdopi}(\theta)$, z przebiegu funkcji $d_{pri}(\theta)$ (rys. 2.3) – wzór (2.19) oraz bieżącą wartość progową $d_{pri}(\theta)$ – wzór (2.17). Charakterystyka progowa (rys. 2.3) pozwala badać położenie wyznaczonej wartości progowej bieżącej $d_{pri}(\theta)$ względem wyznaczonej z $d_{pr3}(\theta)$ i $d_{dopi}(\theta)$ linii prostej.

Wartością dopuszczalną (2.18) jest największa wartość, jaką parametr może osiągnąć po czasie odpowiadającym resursowi.



Rys. 2.3. Charakterystyka progowa i badanie położenia $d_{pri}(\theta)$ względem charakterystyki progowej (linia ciągła) [11, 16, 17]

Uszkodzenie istnieje wtedy, gdy dla chwili θ_i $d_{pr_i}(\theta) \geq d_{pr_{dop_i}}$. Należy zauważyć, że dla $\theta = 0$, $d_{pr_i}(\theta) \leq d_{pr\ dop_i}$ (brak jest uszkodzeń – obiekt jest zdatny) oraz że dla $\theta = \theta_{max}$, $d_{pr}(\theta) = d_{pr\ dop_i} = d_{dop}$ (wypracowany resurs – obiekt nie jest zdatny). Rys. 2.3 przedstawia sytuację, gdy brak jest uszkodzenia w czasie θ_i. Dysponując liczbami uszkodzeń, można wyznaczyć charakterystyki niezawodnościowe dla każdej chwili eksploatacji obiektu technicznego.

2.5. Przykład identyfikacji uszkodzeń zespołów pompowych podczas ich eksploatacji

Na fot. 2.1 przedstawiono zespół pompowy, którego układ łożyskowania został poddany wszechstronnym badaniom eksploatacyjnym (regulacyjnym, diagnostycznym i niezawodnościowym).

Fot. 2.1. Zespół pompowy (1 – trójfazowy silnik, 2 – sprzęgło, 3 – pompa)

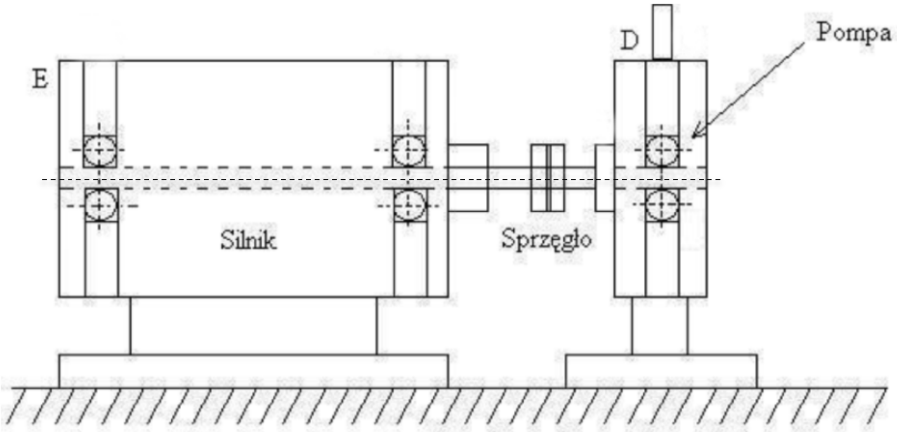
Podstawą identyfikacji uszkodzeń parametrycznych i chwilowych będą badania eksploatacyjne zespołów pompowych, bazujące na szeroko stosowanych metodach diagnozowania [22].

2.5.1. Funkcjonalna metoda diagnozowania układu łożyskowania

Funkcjonalna metoda diagnozowania polega na obserwacji, rejestracji i analizie sygnałów zależnych od zakresu pracy zespołu pompowego i wpływu na tę pracę otoczenia. Funkcjonowanie i stan zespołu pompowego odwzorowują sygnały diagnostyczne i otoczenia. Na podstawie analizy przebiegów można rozpoznać sposoby i warunki użytkowania niekorzystne dla zespołu pompowego. Porównywanie wartości sygnałów funkcjonalnych zmierzonych w czasie działania zespołu pompowego z wartościami dopuszczalnymi jest bardzo ważnym elementem diagnozowania funkcjonalnego. W miarę zwiększania się czasu użytkowania mogą pojawić się niekorzystne tendencje zmian wartości tych sygnałów, co może spowodować wzrost intensywności zużywania elementów układu tribologicznego.

Sygnały funkcjonalne mierzone są w sposób ciągły. W pewnych sytuacjach sygnalizowane jest pojawienie się dopuszczalnej wartości sygnału. W sposób ciągły mierzy się następujące wielkości:

- prąd (rys. 2.4, pkt. E) – sygnał otoczenia,
- ciśnienie tłoczenia (rys. 2.4, pkt. D) – sygnał diagnostyczny.



Rys. 2.4. Rozmieszczenie czujników na zespole pompowym (pomiar sygnałów funkcjonalnych) [22]. E – punkt pomiarowy prądu, D – punkt pomiarowy ciśnienia tłoczenia

Wymienione powyżej sygnały obserwowane są podczas działania zespołu pompowego i porównywane z wartościami dopuszczalnymi. W przypadkach sygnalizacji wartości dopuszczalnej, sygnał alarmu pojawia się wtedy, gdy spadek lub wzrost wartości sygnału funkcjonalnego osiągnie wartość uznaną za niebezpieczną. Można wyodrębnić także grupę sygnałów mierzonych w określonych odstępach czasu użytkowania zespołu pompowego.

Na wartość (zmianę) sygnałów funkcjonalnych wpływają:

- liczba uruchomień i wyłączeń zespołu pompowego,
- częstotliwość zmian zakresów pracy,
- czas pracy w warunkach małej prędkości obrotowej,
- warunki otoczenia,
- jakość obsługi technicznej.

Metoda funkcjonalna polega na rejestrowaniu i analizie wskazań przyrządów i danych pomiarowych, uzyskanych przy wykonywaniu obsług technicznych silnika.

Analiza wartości parametrów wyznaczonych na podstawie wzorów (2.3) i (2.4) pozwala stwierdzić, czy nie zostały przekroczone wartości dopuszczalne wartości progów diagnostycznych (podrozdział 2.4). Wartości powyższych parametrów (sygnałów) są odzwierciedleniem faktycznych warunków bieżącej jakości pracy układu łożyskowania.

2.5.2. Wibroakustyczna metoda diagnozowania układu łożyskowania

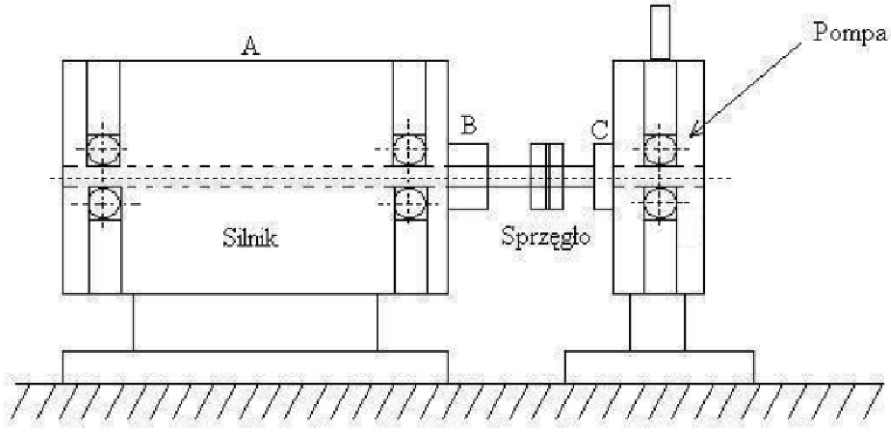
Metoda wibroakustyczna polega na rejestrowaniu sygnałów drgań podzespołów zespołu pompowego.

Zmiany występujące w kolejnych pomiarach parametrów będą miarą zmian zachodzących w układach konstrukcyjnych w miarę zwiększania się czasu pracy lub w wyniku wystąpienia przypadków intensywnego zużycia. Należy spodziewać się zmian amplitudy, stałych prążków widma w paśmie głównych częstotliwości wymuszających lub powstawania nowych prążków na skutek zmiany częstotliwości drgań elementów pomp pracujących z innymi prędkościami obrotowymi.

Analiza zmian parametrów drgań pozwala na zlokalizowanie źródła drgań, a tym samym na wskazanie miejsc, w których nastąpiły zmiany spowodowane zużyciem lub uszkodzeniem.

Parametry drgań zależą od stanu technicznego podzespołów, dla których drgania zostały zarejestrowane. Czujniki drgań umieszcza się w płaszczyźnie łożysk silnika oraz obudowy pompy. Zmiana parametrów drgań jest odzwierciedleniem stanu technicznego łożysk silnika napędzającego zespół pompowy, jak i pompy.

Objęcie rejestracją drgań (rys. 2.5) zespołów pompowych kończących czas międzyremontowy, eksploatowanych w warunkach podwyższonych obciążeń czy wykazujących podwyższony poziom zużycia, pozwoli na prognozowanie okresu bezpiecznej eksploatacji. Jest to jednak możliwe pod warunkiem znajomości przebiegu charakterystyk wibroakustycznych dla różnych stanów zużycia badanych elementów. Dane te nie są jednak dostępne, a ocena prowadzona jest metodą ekspercką.



Rys. 2.5. Rozmieszczenie czujników na zespole pompowym (pomiar sygnałów wibroakustycznych) [22]. A, B, C – punkty pomiarowe (pomiar drgań)

Aparatura wykorzystana do badań wibroakustycznych firmy Easy Laser:

- jednostka wyświetlacza D279,
- system pomiarowy D505,
- sonda wibrometru D289 (zakres pomiaru: 0 -50 mm/s RMS, rozdzielczość: 0,1 mm/s, zakres częstotliwości: 2 – 3200 Hz lub 10 – 3200 Hz, stan łożysk: 3200 – 20000 Hz, czułość: 100 mV/g (+/- 10%), magnes: L = 20 mm, ϕ = 15 mm).

Przygotowanie zespołu pompowego do rejestracji sygnałów wibroakustycznych.

1. Zamocowanie czujników drgań w wybranych miejscach zespołu pompowego i połączenie ich z aparaturą rejestrującą.
2. Przygotowanie aparatury rejestrującej.

Punkty pomiarowe (rys. 2.5):

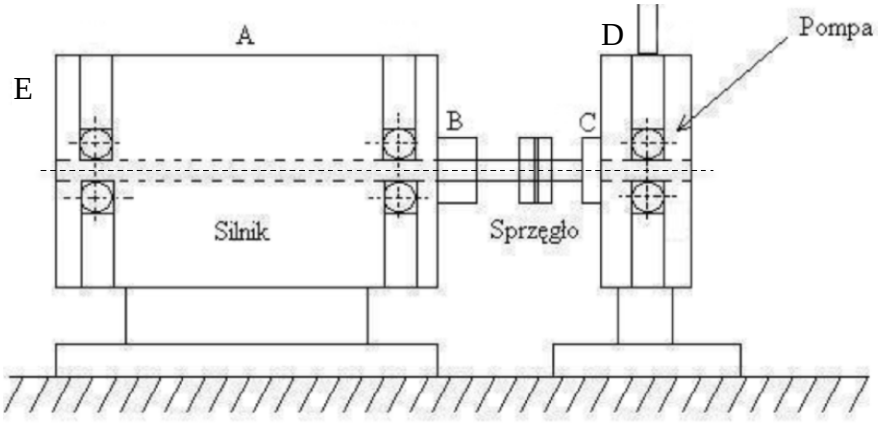
- korpus silnika elektrycznego (punkt pomiarowy A i B – pomiar drgań),
- korpus pompy (punkt pomiarowy C – pomiar drgań).

Przebieg rejestracji sygnałów wibroakustycznych:

- uruchomienie zespołu pompowego,
- stabilizacja parametrów zespołu pompowego,
- rejestracja sygnałów wibroakustycznych po ustabilizowaniu się wartości parametrów zespołu pompowego w czasie 1 min.

W tej metodzie diagnozowania sygnałem otoczenia jest sygnał ciśnienia tłoczenia, a diagnostycznym – przyspieszenie i prędkość drgań. Kompleksowy sygnał wibroakustyczny wyznacza się ze wzoru (2.8), a użytkowy ze wzoru (2.7). Przebiegi parametrów a_{Rb} i a_{Rc} wyznacza się z równań interakcji (2.1) i (2.2), a identyfikację uszkodzeń ze wzorów (2.3) i (2.4).

2.5.3. Kompleksowa metoda diagnozowania układu łożyskowania



Rys. 2.6. Rozmieszczenie czujników na zespole pompowym [22].
A, B, C – punkty pomiarowe (pomiar drgań), E – amperomierz (pomiar prądu), D – manometr (pomiar ciśnienia tłoczenia)

Kompleksowa metoda oceny zdatności (rys. 2.6) wykorzystuje wszystkie sygnały funkcjonalne i wibroakustyczne. Wyróżnia się tu kompleksową metodę oceny stanu technicznego i stanu działania układu łożyskowania.

W metodzie tej sygnałami stanu technicznego (diagnostycznymi) są:
A – przyspieszenie amplitudowe [m/s^2],
V – prędkość amplitudowa [mm/s],
S – amplituda [mm].

Sygnałami stanu działania (otoczenia) są:
I – natężenie prądu [A],
p – ciśnienie tłoczenia [MPa].

Kompleksowy sygnał diagnostyczny wyznacza się na podstawie wzoru (2.8), a sygnał otoczenia na podstawie (2.7). Przebiegi parametrów a_{Rb} i a_{Rc} wyznaczane są ze wzorów (2.3) i (2.4) lub (2.11) i (2.12) z uwzględnieniem warunków początkowych.

2.5.4. Badania eksploatacyjne układu łożyskowania zespołów pompowych

Założono, że badania eksploatacyjne zostały przeprowadzone dla dwóch obiektów (zespół pompowy nr 3 i nr 4). Każdy z obiektów był badany w dwóch okresach obserwacji. Takie podejście pozwala analizować stan niezawodnościowy jednego obiektu względem drugiego, a także z kolejnego okresu obserwacji względem poprzedniego.

Wartości rzeczywiste i względne sygnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia zespołu pompowego nr 3 przedstawiono w tab. 2.1 a i b, natomiast zespołu pompowego nr 4 w tab. 2.2 a i b.

Tab. 2.1 a. Zmierzone wartości sygnałów diagnostycznych (A, V, s) i sygnałów otoczenia (I, p) zespołu pompowego nr 3

θ [godz.]	A [m/s^2]	V [mm/s]	S [mm]	I [A]	p [bar]
8329	40,50	20,75	0,02	124,00	0,30
8354	33,75	16,00	0,02	89,00	0,30
8401	34,50	18,25	0,02	59,00	0,30
8442	19,50	15,75	0,03	63,00	0,30
8487	36,00	21,25	0,03	137,00	0,30
8531	37,50	18,50	0,02	105,00	0,30
8578	33,00	15,00	0,01	122,00	0,30
8602	27,00	17,88	0,02	111,00	0,30
8648	28,50	11,75	0,01	59,00	0,30
8675	28,50	16,25	0,02	87,00	0,30
8699	25,50	15,75	0,02	67,00	0,30
8744	47,25	25,75	0,03	73,00	0,30
8769	28,50	14,00	0,01	79,00	0,30
8819	25,50	13,75	0,01	78,00	0,30
8838	23,25	15,75	0,02	55,00	0,30
8861	19,50	12,00	0,01	73,00	0,30
8909	30,00	20,00	0,03	140,00	0,30
8937	30,00	20,00	0,03	155,00	0,30
8982	33,00	15,00	0,01	129,00	0,30
9006	24,75	13,00	0,01	78,00	0,30
9029	37,50	18,50	0,02	100,00	0,30
14880	28,50	15,25	0,02	90,00	0,30
14920	37,50	18,00	0,02	105,00	0,30
14960	24,75	13,00	0,01	78,00	0,30
15003	19,50	12,00	0,01	70,00	0,30
15033	25,50	12,50	0,01	65,00	0,30
15073	30,00	13,63	0,01	79,00	0,30
15100	33,00	15,25	0,01	123,00	0,30
15140	23,25	15,75	0,02	55,00	0,30
15182	26,76	20,98	0,03	125,00	0,30
15206	33,34	10,08	0,06	90,00	0,30
15312	45,85	18,22	0,02	102,00	0,30
15352	12,54	15,47	0,04	120,00	0,30
15358	25,92	25,51	0,00	70,00	0,30
15407	10,03	18,12	0,01	67,00	0,30
15431	37,53	18,60	0,02	72,00	0,30
15461	45,02	26,48	0,02	75,00	0,30
15540	18,39	14,69	0,02	122,00	0,30
15612	45,85	26,67	0,02	81,00	0,30
15685	14,21	14,21	0,03	122,00	0,30
15691	34,18	34,54	0,01	47,00	0,30

Tab. 2.1 b. Względne wartości sygnałów diagnostycznych (A, V, s) i sygnałów otoczenia (I, p) zespołu pompowego nr 3

θ [godz.]	$\overline{A}$	$\overline{V}$	$\overline{S}$	$\overline{I}$	$\overline{p}$
8329	0,86	0,60	0,35	0,80	1,00
8354	0,71	0,46	0,25	0,57	1,00
8401	0,73	0,53	0,32	0,38	1,00
8442	0,41	0,46	0,42	0,41	1,00
8487	0,76	0,62	0,41	0,88	1,00
8531	0,79	0,54	0,30	0,68	1,00
8578	0,70	0,43	0,22	0,79	1,00
8602	0,57	0,52	0,39	0,72	1,00
8648	0,60	0,34	0,16	0,38	1,00
8675	0,60	0,47	0,30	0,56	1,00
8699	0,54	0,46	0,32	0,43	1,00
8744	1,00	0,75	0,46	0,47	1,00
8769	0,60	0,41	0,23	0,51	1,00
8819	0,54	0,40	0,24	0,50	1,00
8838	0,49	0,46	0,35	0,35	1,00
8861	0,41	0,35	0,24	0,47	1,00
8909	0,63	0,58	0,44	0,90	1,00
8937	0,63	0,58	0,44	1,00	1,00
8982	0,70	0,43	0,22	0,83	1,00
9006	0,52	0,38	0,22	0,50	1,00
9029	0,79	0,54	0,30	0,65	1,00
14880	0,60	0,44	0,27	0,58	1,00
14920	0,79	0,52	0,28	0,68	1,00
14960	0,52	0,38	0,22	0,50	1,00
15003	0,41	0,35	0,24	0,45	1,00
15033	0,54	0,36	0,20	0,42	1,00
15073	0,63	0,39	0,20	0,51	1,00
15100	0,70	0,44	0,23	0,79	1,00
15140	0,49	0,46	0,35	0,35	1,00
15182	0,57	0,61	0,54	0,81	1,00
15206	0,71	0,29	1,00	0,58	1,00
15312	0,97	0,53	0,38	0,66	1,00
15352	0,27	0,45	0,63	0,77	1,00
15358	0,55	0,74	0,04	0,45	1,00
15407	0,21	0,52	0,22	0,43	1,00
15431	0,79	0,54	0,32	0,46	1,00
15461	0,95	0,77	0,28	0,48	1,00
15540	0,39	0,43	0,39	0,79	1,00
15612	0,97	0,77	0,25	0,52	1,00
15685	0,30	0,41	0,47	0,79	1,00
15691	0,72	1,00	0,16	0,30	1,00

Tab. 2.2 a. Zmierzone wartości sygnałów diagnostycznych (A, V, s) i sygnałów otoczenia (I, p) zespołu pompowego nr 4

θ [godz.]	A [m/s^2]	V [mm/s]	S [mm]	I [A]	p [bar]
8315	28,50	16,75	0,02	83,00	0,30
8340	30,75	15,00	0,01	126,00	0,30
8365	35,25	14,75	0,01	103,00	0,30
8437	58,50	15,75	0,01	115,00	0,30
8447	19,50	15,13	0,02	69,00	0,30
8509	15,00	14,25	0,01	157,00	0,30
8567	51,00	16,75	0,02	83,00	0,30
8591	20,25	12,75	0,02	50,00	0,30
8615	19,50	14,00	0,01	107,00	0,30
8660	46,50	13,75	0,02	78,00	0,30
8699	31,50	16,25	0,01	107,00	0,30
8735	46,50	16,25	0,02	87,00	0,30
8756	42,00	22,75	0,01	87,00	0,30
8780	28,50	12,50	0,01	87,00	0,30
8826	40,50	12,25	0,02	89,00	0,30
8850	16,50	14,00	0,02	87,00	0,30
8900	15,00	11,00	0,02	89,00	0,30
8924	18,00	14,00	0,03	89,00	0,30
8949	18,00	15,25	0,01	50,00	0,30
8995	19,50	11,25	0,00	157,00	0,30
9017	79,50	13,00	0,01	53,00	0,30
14890	82,50	16,75	0,02	97,00	0,30
14930	15,00	12,50	0,01	87,00	0,30
14970	40,50	15,88	0,01	50,00	0,30
14990	19,50	10,00	0,01	40,00	0,30
15020	19,50	10,00	0,01	142,00	0,30
15070	34,50	13,50	0,02	87,00	0,30
15120	45,00	11,63	0,01	142,00	0,30
15200	34,50	14,50	0,03	87,00	0,30
15247	15,00	15,13	0,21	85,00	0,30
15353	42,58	36,30	0,11	58,00	0,30
15416	25,17	55,22	0,30	147,00	0,30
15466	30,17	12,99	0,01	139,00	0,30
15472	35,03	27,42	0,00	55,00	0,30
15563	35,03	27,61	0,29	147,00	0,30
15569	59,57	19,02	0,07	61,00	0,30
15588	69,47	26,08	0,00	64,00	0,30
15606	44,19	25,20	0,21	112,00	0,30
15659	50,34	22,90	0,14	100,00	0,30
15683	50,67	14,83	0,12	59,00	0,30
15798	49,68	14,83	0,06	69,00	0,30

Tab. 2.2 b. Względne wartości sygnałów diagnostycznych (A, V, s) i sygnałów otoczenia zespołu (I, p) pompowego nr 4

θ [godz.]	$\overline{A}$	$\overline{V}$	$\overline{S}$	$\overline{I}$	$\overline{p}$
8315	0,35	0,30	0,07	0,53	1,00
8340	0,37	0,27	0,05	0,80	1,00
8365	0,43	0,27	0,04	0,66	1,00
8437	0,71	0,29	0,03	0,73	1,00
8447	0,24	0,27	0,08	0,44	1,00
8509	0,18	0,26	0,04	1,00	1,00
8567	0,62	0,30	0,05	0,53	1,00
8591	0,25	0,23	0,07	0,32	1,00
8615	0,24	0,25	0,03	0,68	1,00
8660	0,56	0,25	0,06	0,50	1,00
8699	0,38	0,29	0,04	0,68	1,00
8735	0,56	0,29	0,08	0,55	1,00
8756	0,51	0,41	0,04	0,55	1,00
8780	0,35	0,23	0,02	0,55	1,00
8826	0,49	0,22	0,08	0,57	1,00
8850	0,20	0,25	0,05	0,55	1,00
8900	0,18	0,20	0,07	0,57	1,00
8924	0,22	0,25	0,09	0,57	1,00
8949	0,22	0,28	0,04	0,32	1,00
8995	0,24	0,20	0,01	1,00	1,00
9017	0,96	0,24	0,02	0,34	1,00
14890	1,00	0,30	0,07	0,62	1,00
14930	0,18	0,23	0,04	0,55	1,00
14970	0,49	0,29	0,03	0,32	1,00
14990	0,24	0,18	0,03	0,25	1,00
15020	0,24	0,18	0,04	0,90	1,00
15070	0,42	0,24	0,06	0,55	1,00
15120	0,55	0,21	0,04	0,90	1,00
15200	0,42	0,26	0,10	0,55	1,00
15247	0,18	0,27	0,70	0,54	1,00
15353	0,52	0,66	0,36	0,37	1,00
15416	0,31	1,00	1,00	0,94	1,00
15466	0,37	0,24	0,04	0,89	1,00
15472	0,42	0,50	0,00	0,35	1,00
15563	0,42	0,50	0,97	0,94	1,00
15569	0,72	0,34	0,23	0,39	1,00
15588	0,84	0,47	0,00	0,41	1,00
15606	0,54	0,46	0,70	0,71	1,00
15659	0,61	0,41	0,48	0,64	1,00
15683	0,61	0,27	0,41	0,38	1,00
15798	0,60	0,27	0,19	0,44	1,00

Tab. 2.3 a. Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i parametru stanu regulacji a_{Rc} zespołu pompowego nr 3 (bez warunków początkowych)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}
8329	0	1,10	1,28		
8354	25	0,89	1,15	0,14712	0,06790
8401	72	0,96	1,07	0,02594	0,02823
8442	113	0,74	1,08	0,04053	0,00139
8487	158	1,06	1,33	0,64816	0,25017
8531	202	1,00	1,21	0,05105	0,11336
8578	249	0,85	1,27	0,02160	0,00692
8602	273	0,86	1,23	0,00516	0,01395
8648	319	0,71	1,07	0,03060	0,02288
8675	346	0,82	1,15	0,08429	0,03735
8699	370	0,78	1,09	0,04018	0,03165
8744	415	1,33	1,11	0,02700	0,00067
8769	440	0,76	1,12	0,19424	0,00383
8819	490	0,71	1,12	0,00626	0,00026
8838	509	0,76	1,06	0,03852	0,02908
8861	532	0,59	1,11	0,02946	0,00552
8909	580	0,96	1,35	0,15547	0,04756
8937	608	0,96	1,41	0,00000	0,01473
8982	653	0,85	1,30	0,02220	0,01359
9006	677	0,68	1,12	0,05018	0,03459
9029	700	1,00	1,19	0,11449	0,02448
14880	0	0,79	1,16		
14920	40	0,99	1,21	0,06373	0,01400
14960	80	0,68	1,12	0,06801	0,01273
15003	123	0,59	1,10	0,01460	0,00217
15033	153	0,68	1,08	0,07510	0,00532
15073	193	0,77	1,12	0,09479	0,05609
15100	220	0,86	1,28	0,70208	0,47685
15140	260	0,76	1,06	0,05959	0,11194
15182	302	0,99	1,28	0,05131	0,03833
15206	326	1,26	1,16	0,02665	0,01046
15312	432	1,17	1,20	0,00317	0,00130
15352	472	0,82	1,26	0,07270	0,00817
15358	478	0,92	1,10	0,17429	0,31172
15407	527	0,61	1,09	0,03294	0,00054
15431	551	1,01	1,10	0,08933	0,00274
15461	581	1,25	1,11	0,02008	0,00062
15540	660	0,69	1,27	0,02684	0,00514
15612	732	1,27	1,13	0,02014	0,00480
15685	805	0,69	1,27	0,02880	0,00477
15691	811	1,24	1,04	0,21218	0,08343

D_K i U oblicza się na podstawie danych z tab. 2.1 b i wzorów (2.7) i (2.8), a_{Rb} i a_{Rc} oblicza się z wzorów (2.3) i (2.4).

Tab. 2.3 b. Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i parametru stanu regulacji a_{Rc} zespołu pompowego nr 3 (z warunkami początkowymi)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}
8329	0	1,10	1,28		
8354	25	0,89	1,15	-0,00488	-0,00221
8401	72	0,96	1,07	0,00078	-0,00080
8442	113	0,74	1,08	-0,00325	0,00011
8487	158	1,06	1,33	0,00328	0,00219
8531	202	1,00	1,21	-0,00068	-0,00119
8578	249	0,85	1,27	-0,00174	0,00057
8602	273	0,86	1,23	0,00026	-0,00074
8648	319	0,71	1,07	-0,00220	-0,00161
8675	346	0,82	1,15	0,00247	0,00124
8699	370	0,78	1,09	-0,00126	-0,00108
8744	415	1,33	1,11	0,00556	0,00015
8769	440	0,76	1,12	-0,01383	0,00030
8819	490	0,71	1,12	-0,00060	-0,00003
8838	509	0,76	1,06	0,00146	-0,00140
8861	532	0,59	1,11	-0,00507	0,00087
8909	580	0,96	1,35	0,00391	0,00199
8937	608	0,96	1,41	0,00000	0,00091
8982	653	0,85	1,30	-0,00138	-0,00101
9006	677	0,68	1,12	-0,00467	-0,00336
9029	700	1,00	1,19	0,00739	0,00128
14880	0	0,79	1,16		
14920	40	0,99	1,21	0,00248	0,00053
14960	80	0,68	1,12	-0,00567	-0,00099
15003	123	0,59	1,10	-0,00179	-0,00024
15033	153	0,68	1,08	0,00230	-0,00020
15073	193	0,77	1,12	0,00157	0,00042
15100	220	0,86	1,28	0,00171	0,00232
15140	260	0,76	1,06	-0,00177	-0,00245
15182	302	0,99	1,28	0,00285	0,00210
15206	326	1,26	1,16	0,00531	-0,00223
15312	432	1,17	1,20	-0,00041	0,00016
15352	472	0,82	1,26	-0,00491	0,00070
15358	478	0,92	1,10	0,01023	-0,01229
15407	527	0,61	1,09	-0,00469	-0,00007
15431	551	1,01	1,10	0,00933	0,00024
15461	581	1,25	1,11	0,00382	0,00012
15540	660	0,69	1,27	-0,00436	0,00085
15612	732	1,27	1,13	0,00369	-0,00087
15685	805	0,69	1,27	-0,00494	0,00081
15691	811	1,24	1,04	0,04244	-0,01730

Wartości parametru a_{Rb} i a_{Rc} z uwzględnieniem warunków początkowych. D_K i U oblicza się na podstawie danych z tab. 2.1 b i wzorów (2.7) i (2.8), a_{Rb} i a_{Rc} oblicza się ze wzorów (2.11) i (2.12).

Tab. 2.4 a. Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i parametru stanu regulacji a_{Rc} zespołu pompowego nr 4 (bez warunków początkowych)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}
8315	0	0,46	1,13		
8340	25	0,46	1,28	0,00091	0,07910
8365	50	0,51	1,20	0,02793	0,02468
8437	122	0,76	1,24	0,03124	0,00289
8447	132	0,37	1,09	0,08409	0,01154
8509	194	0,32	1,41	0,00515	0,01089
8567	252	0,69	1,13	0,03598	0,01643
8591	276	0,34	1,05	0,17271	0,01185
8615	300	0,35	1,21	0,00068	0,00842
8660	345	0,62	1,12	0,06142	0,01361
8699	384	0,48	1,21	0,62889	0,03065
8735	420	0,64	1,14	0,02158	0,00581
8756	441	0,66	1,14	0,00359	0,00000
8780	465	0,41	1,14	0,06673	0,00000
8826	511	0,54	1,15	0,13227	0,01355
8850	535	0,33	1,14	0,06176	0,00063
8900	585	0,28	1,15	0,00521	0,00025
8924	609	0,35	1,15	0,01980	0,00000
8949	634	0,35	1,05	0,00304	0,00912
8995	680	0,31	1,41	0,00742	0,02204
9017	702	0,99	1,06	0,05280	0,01515
14890	0	1,05	1,18		
14930	40	0,29	1,14	0,05057	0,00107
14970	80	0,57	1,05	0,23500	0,01014
14990	100	0,30	1,03	0,02779	0,00072
15020	130	0,30	1,35	0,00001	0,01260
15070	180	0,49	1,14	1,13540	0,01883
15120	230	0,59	1,35	0,80972	0,02958
15200	310	0,50	1,14	0,20928	0,02793
15247	357	0,77	1,14	0,02541	0,00054
15353	463	0,91	1,07	0,01457	0,00637
15416	526	1,45	1,37	0,00747	0,00411
15466	576	0,44	1,34	0,09042	0,00124
15472	582	0,65	1,06	0,45070	0,52612
15563	673	1,17	1,37	0,02708	0,02038
15569	679	0,83	1,07	0,06761	0,11103
15588	698	0,97	1,08	0,01379	0,00089
15606	716	0,99	1,23	0,00141	0,01348
15659	769	0,88	1,19	0,01090	0,02573
15683	793	0,78	1,07	0,01107	0,17731
15798	908	0,69	1,09	2,86012	0,02809

D_K i U oblicza się na podstawie danych z tab. 2.1 b i wzorów (2.7) i (2.8), a_{Rb} i a_{Rc} oblicza się ze wzorów (2.3) i (2.4).

Tab. 2.4 b. Wartości parametru stanu technicznego a_{Rb} i parametru stanu regulacji a_{Rc} zespołu pompowego nr 4 (z warunkami początkowymi)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	D_K	U	a_{Rb}	a_{Rc}
8315	0	0,46	1,13		
8340	25	0,46	1,28	-0,00003	0,00236
8365	50	0,51	1,20	0,00170	-0,00144
8437	122	0,76	1,24	0,00271	0,00024
8447	132	0,37	1,09	-0,05026	-0,00657
8509	194	0,32	1,41	-0,00111	0,00195
8567	252	0,69	1,13	0,00521	-0,00211
8591	276	0,34	1,05	-0,01718	-0,00151
8615	300	0,35	1,21	0,00021	0,00278
8660	345	0,62	1,12	0,00538	-0,00091
8699	384	0,48	1,21	-0,00358	0,00100
8735	420	0,64	1,14	0,00380	-0,00080
8756	441	0,66	1,14	0,00060	0,00000
8780	465	0,41	1,14	-0,01087	0,00000
8826	511	0,54	1,15	0,00268	0,00006
8850	535	0,33	1,14	-0,01089	-0,00011
8900	585	0,28	1,15	-0,00125	0,00005
8924	609	0,35	1,15	0,00334	0,00000
8949	634	0,35	1,05	0,00044	-0,00181
8995	680	0,31	1,41	-0,00126	0,00304
9017	702	0,99	1,06	0,02010	-0,00757
14890	0	1,05	1,18		
14930	40	0,29	1,14	-0,03213	-0,00035
14970	80	0,57	1,05	0,00665	-0,00108
14990	100	0,30	1,03	-0,02058	-0,00042
15020	130	0,30	1,35	0,00001	0,00422
15070	180	0,49	1,14	0,00381	-0,00179
15120	230	0,59	1,35	0,00176	0,00162
15200	310	0,50	1,14	-0,00101	-0,00111
15247	357	0,77	1,14	0,00437	-0,00006
15353	463	0,91	1,07	0,00084	-0,00030
15416	526	1,45	1,37	0,00376	0,00184
15466	576	0,44	1,34	-0,01744	-0,00027
15472	582	0,65	1,06	0,02936	-0,02052
15563	673	1,17	1,37	0,00285	0,00130
15569	679	0,83	1,07	-0,03939	-0,02177
15588	698	0,97	1,08	0,00433	0,00016
15606	716	0,99	1,23	0,00086	0,00339
15659	769	0,88	1,19	-0,00134	-0,00034
15683	793	0,78	1,07	-0,00273	-0,00217
15798	908	0,69	1,09	-0,00061	0,00009

Wartości parametru a_{Rb} i a_{Rc} z uwzględnieniem warunków początkowych. D_K i U oblicza się na podstawie danych z tab. 2.1 b i wzorów (2.7) i (2.8), a_{Rb} i a_{Rc} oblicza się ze wzorów (2.11) i (2.12).

Tab. 2.5 a. Wartości średnie $\bar{x}$ i odchylenie s standardowe parametrów a_{Rb} i a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.3 a)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$\bar{x}_{a_{Rb}}$	$\bar{x}_{a_{Rc}}$	$s_{a_{Rb}}$	$s_{a_{Rc}}$
8329	0				
8354	25	0,14712	0,06790		
8401	72	0,08653	0,04806	0,08569	0,02805
8442	113	0,07119	0,03251	0,06616	0,03346
8487	158	0,21543	0,08692	0,29350	0,11221
8531	202	0,18256	0,09221	0,26459	0,09789
8578	249	0,15573	0,07799	0,24561	0,09423
8602	273	0,13422	0,06884	0,23132	0,08936
8648	319	0,12127	0,06310	0,21727	0,08431
8675	346	0,11716	0,06024	0,20361	0,07933
8699	370	0,10946	0,05738	0,19351	0,07534
8744	415	0,10196	0,05222	0,18525	0,07349
8769	440	0,10965	0,04819	0,17863	0,07145
8819	490	0,10170	0,04450	0,17341	0,06969
8838	509	0,09719	0,04340	0,16746	0,06708
8861	532	0,09267	0,04088	0,16231	0,06538
8909	580	0,09660	0,04129	0,15759	0,06318
8937	608	0,09092	0,03973	0,15438	0,06151
8982	653	0,08710	0,03828	0,15064	0,05999
9006	677	0,08515	0,03809	0,14664	0,05831
9029	700	0,08662	0,03741	0,14288	0,05684
14880	0				
14920	40				
14960	80	0,06587	0,01337	0,00303	0,00090
15003	123	0,04878	0,00964	0,02968	0,00649
15033	153	0,05536	0,00856	0,02758	0,00572
15073	193	0,06325	0,01806	0,02969	0,02183
15100	220	0,16972	0,09453	0,26215	0,18832
15140	260	0,15399	0,09702	0,24290	0,17203
15182	302	0,14115	0,08968	0,22779	0,16062
15206	326	0,12843	0,08088	0,21647	0,15255
15312	432	0,11590	0,07292	0,20790	0,14601
15352	472	0,11198	0,06703	0,19766	0,13988
15358	478	0,11717	0,08742	0,18932	0,15092
15407	527	0,11069	0,08074	0,18276	0,14649
15431	551	0,10916	0,07517	0,17568	0,14228
15461	581	0,10322	0,07020	0,17085	0,13845
15540	660	0,09845	0,06613	0,16616	0,13474
15612	732	0,09384	0,06253	0,16200	0,13131
15685	805	0,09023	0,05932	0,15791	0,12811
15691	811	0,09665	0,06059	0,15599	0,12463

Tab. 2.5 b. Wartości średnie $\bar{x}$ i odchylenie standardowe s parametrów a_{Rb} i a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.3 b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$\bar{x}_{a_{Rb}}$	$\bar{x}_{a_{Rc}}$	$s_{a_{Rb}}$	$s_{a_{Rc}}$
8329	0				
8354	25	0,00488	0,00221		
8401	72	0,00283	0,00150	0,00290	0,00100
8442	113	0,00297	0,00104	0,00206	0,00107
8487	158	0,00305	0,00133	0,00169	0,00105
8531	202	0,00257	0,00130	0,00181	0,00091
8578	249	0,00243	0,00118	0,00165	0,00087
8602	273	0,00212	0,00111	0,00172	0,00081
8648	319	0,00213	0,00118	0,00159	0,00077
8675	346	0,00217	0,00118	0,00149	0,00072
8699	370	0,00208	0,00117	0,00144	0,00068
8744	415	0,00240	0,00108	0,00172	0,00071
8769	440	0,00335	0,00102	0,00369	0,00072
8819	490	0,00314	0,00094	0,00361	0,00074
8838	509	0,00302	0,00097	0,00350	0,00072
8861	532	0,00315	0,00097	0,00341	0,00069
8909	580	0,00320	0,00103	0,00330	0,00072
8937	608	0,00301	0,00102	0,00329	0,00070
8982	653	0,00292	0,00102	0,00322	0,00068
9006	677	0,00301	0,00115	0,00315	0,00085
9029	700	0,00323	0,00115	0,00322	0,00083
14880	0				
14920	40	0,00248	0,00053		
14960	80	0,00407	0,00076	0,00225	0,00032
15003	123	0,00331	0,00058	0,00207	0,00038
15033	153	0,00306	0,00049	0,00176	0,00036
15073	193	0,00276	0,00047	0,00166	0,00032
15100	220	0,00259	0,00078	0,00155	0,00080
15140	260	0,00247	0,00102	0,00145	0,00097
15182	302	0,00252	0,00115	0,00135	0,00097
15206	326	0,00283	0,00127	0,00157	0,00098
15312	432	0,00259	0,00116	0,00166	0,00099
15352	472	0,00280	0,00112	0,00173	0,00095
15358	478	0,00342	0,00205	0,00271	0,00335
15407	527	0,00351	0,00190	0,00261	0,00325
15431	551	0,00393	0,00178	0,00295	0,00316
15461	581	0,00392	0,00167	0,00285	0,00307
15540	660	0,00395	0,00162	0,00275	0,00298
15612	732	0,00393	0,00157	0,00267	0,00289
15685	805	0,00399	0,00153	0,00260	0,00281
15691	811	0,00601	0,00236	0,00917	0,00453

Wartości z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.6 a. Wartości średnie $\bar{x}$ i odchylenie standardowe s parametrów a_{Rb} i a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 a)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$\bar{x}_{a_{Rb}}$	$\bar{x}_{a_{Rc}}$	$s_{a_{Rb}}$	$s_{a_{Rc}}$
8315	0				
8340	25	0,00091	0,07910		
8365	50	0,01442	0,05189	0,01911	0,03848
8437	122	0,02003	0,03555	0,01664	0,03925
8447	132	0,03604	0,02955	0,03479	0,03422
8509	194	0,02986	0,02582	0,03315	0,03079
8567	252	0,03088	0,02425	0,02975	0,02781
8591	276	0,05114	0,02248	0,06009	0,02581
8615	300	0,04484	0,02072	0,05843	0,02441
8660	345	0,04668	0,01993	0,05493	0,02296
8699	384	0,10490	0,02100	0,19126	0,02191
8735	420	0,09733	0,01962	0,18317	0,02128
8756	441	0,08951	0,01799	0,17673	0,02107
8780	465	0,08776	0,01660	0,16933	0,02078
8826	511	0,09094	0,01639	0,16312	0,01998
8850	535	0,08900	0,01534	0,15736	0,01968
8900	585	0,08376	0,01439	0,15346	0,01938
8924	609	0,08000	0,01355	0,14940	0,01909
8949	634	0,07572	0,01330	0,14607	0,01855
8995	680	0,07213	0,01376	0,14281	0,01814
9017	702	0,07116	0,01383	0,13907	0,01765
14890	0				
14930	40				
14970	80	0,14279	0,00560	0,13041	0,00641
14990	100	0,10446	0,00397	0,11363	0,00534
15020	130	0,07835	0,00613	0,10647	0,00613
15070	180	0,28976	0,00867	0,48164	0,00778
15120	230	0,37642	0,01216	0,48025	0,01101
15200	310	0,35254	0,01441	0,44293	0,01169
15247	357	0,31165	0,01268	0,42607	0,01188
15353	463	0,27864	0,01197	0,41067	0,01131
15416	526	0,25152	0,01119	0,39657	0,01095
15466	576	0,23688	0,01028	0,37934	0,01081
15472	582	0,25470	0,05327	0,36692	0,14927
15563	673	0,23719	0,05074	0,35692	0,14320
15569	679	0,22508	0,05505	0,34590	0,13852
15588	698	0,21099	0,05144	0,33776	0,13422
15606	716	0,19789	0,04906	0,33048	0,13001
15659	769	0,18689	0,04769	0,32319	0,12601
15683	793	0,17712	0,05489	0,31626	0,12601
15798	908	0,31833	0,05348	0,68799	0,12261

Wartości bez uwzględnienia warunków początkowych.

Tab. 2.6 b. Wartości średnie $\bar{x}$ i odchylenie standardowe s parametrów a_{Rb} i a_{Rc} dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$\overline{x}_{a_{Rb}}$	$\overline{x}_{a_{Rc}}$	$s_{a_{Rb}}$	$s_{a_{Rc}}$
8315	0				
8340	25	0,00003	0,00236		
8365	50	0,00086	0,00190	0,00118	0,00065
8437	122	0,00148	0,00135	0,00135	0,00106
8447	132	0,01367	0,00265	0,02442	0,00275
8509	194	0,01116	0,00251	0,02188	0,00240
8567	252	0,01017	0,00245	0,01972	0,00216
8591	276	0,01117	0,00231	0,01820	0,00200
8615	300	0,00980	0,00237	0,01729	0,00186
8660	345	0,00931	0,00221	0,01624	0,00181
8699	384	0,00874	0,00209	0,01542	0,00174
8735	420	0,00829	0,00197	0,01470	0,00170
8756	441	0,00765	0,00181	0,01419	0,00172
8780	465	0,00789	0,00167	0,01362	0,00172
8826	511	0,00752	0,00155	0,01316	0,00171
8850	535	0,00775	0,00146	0,01271	0,00169
8900	585	0,00734	0,00137	0,01238	0,00167
8924	609	0,00711	0,00129	0,01203	0,00165
8949	634	0,00674	0,00132	0,01177	0,00160
8995	680	0,00645	0,00141	0,01151	0,00161
9017	702	0,00713	0,00172	0,01161	0,00209
14890	0				
14930	40	0,03213	0,00035		
14970	80	0,01939	0,00072	0,01802	0,00052
14990	100	0,01979	0,00062	0,01276	0,00040
15020	130	0,01484	0,00152	0,01437	0,00183
15070	180	0,01264	0,00157	0,01338	0,00159
15120	230	0,01082	0,00158	0,01277	0,00142
15200	310	0,00942	0,00151	0,01223	0,00131
15247	357	0,00879	0,00133	0,01146	0,00132
15353	463	0,00791	0,00122	0,01105	0,00128
15416	526	0,00749	0,00128	0,01050	0,00122
15466	576	0,00840	0,00119	0,01040	0,00120
15472	582	0,01014	0,00280	0,01162	0,00570
15563	673	0,00958	0,00268	0,01131	0,00547
15569	679	0,01171	0,00405	0,01347	0,00732
15588	698	0,01122	0,00379	0,01312	0,00713
15606	716	0,01057	0,00376	0,01294	0,00689
15659	769	0,01003	0,00356	0,01272	0,00672
15683	793	0,00962	0,00348	0,01246	0,00653
15798	908	0,00915	0,00331	0,01229	0,00639

Wartości z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.7 a. Mapa uszkodzeń dla zespołu pompowego nr 3 przy różnych wartościach odchylenia standardowego *s* (dla danych z tab. 2.3 a)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$m(t)_{a_{Rb}}$				$m(t)_{a_{Rc}}$			
		0,25 *s*	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***	**0,25 *s***	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***
8329	0								
8354	25								
8401	72	0	0	0	0	1	1	1	1
8442	113	1	1	0	0	1	0	0	0
8487	158	0	1	1	1	1	1	1	1
8531	202	0	0	0	0	0	1	1	1
8578	249	1	0	0	0	0	0	0	0
8602	273	1	0	0	0	0	0	0	0
8648	319	1	0	0	0	0	0	0	0
8675	346	1	0	0	0	1	0	0	0
8699	370	1	0	0	0	0	0	0	0
8744	415	1	0	0	0	0	0	0	0
8769	440	1	1	1	1	1	0	0	0
8819	490	1	0	0	0	0	0	0	0
8838	509	1	0	0	0	0	0	0	0
8861	532	1	0	0	0	0	0	0	0
8909	580	0	1	1	0	1	1	1	0
8937	608	1	0	0	0	0	0	0	0
8982	653	1	0	0	0	0	0	0	0
9006	677	0	0	0	0	1	1	0	0
9029	700	1	1	1	0	1	0	0	0
14880	0								
14920	40								
14960	80	0	1	1	1	1	1	1	1
15003	123	1	0	0	0	1	0	0	0
15033	153	0	1	1	1	1	1	1	0
15073	193	0	1	1	1	1	1	1	1
15100	220	0	1	1	1	1	1	1	1
15140	260	0	0	0	0	0	1	0	0
15182	302	1	0	0	0	0	0	0	0
15206	326	1	0	0	0	0	0	0	0
15312	432	1	0	0	0	0	0	0	0
15352	472	1	0	0	0	1	0	0	0
15358	478	0	1	1	0	1	1	1	1
15407	527	1	0	0	0	0	0	0	0
15431	551	1	1	0	0	1	0	0	0
15461	581	1	0	0	0	0	0	0	0
15540	660	1	0	0	0	0	0	0	0
15612	732	1	0	0	0	0	0	0	0
15685	805	1	0	0	0	0	0	0	0
15691	811	0	1	1	1	1	1	0	0

Tab. 2.7 b. Mapa uszkodzeń dla zespołu pompowego nr 3 przy różnych wartościach odchylenia standardowego *s* (dla danych z tab. 2.3 b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$m(t)_{a_{Rb}}$				$m(t)_{a_{Rc}}$			
		0,25 *s*	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***	**0,25 *s***	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***
8329	0								
8354	25								
8401	72	1	0	0	0	1	1	1	0
8442	113	1	1	1	1	0	0	0	0
8487	158	1	1	1	1	1	1	1	1
8531	202	1	0	0	0	1	1	1	1
8578	249	1	1	1	1	0	0	0	0
8602	273	0	0	0	0	0	0	0	0
8648	319	1	1	1	1	1	1	1	1
8675	346	1	1	1	1	1	1	1	1
8699	370	1	1	1	0	1	1	1	1
8744	415	1	1	1	1	0	0	0	0
8769	440	1	1	1	1	0	0	0	0
8819	490	0	0	0	0	0	0	0	0
8838	509	1	0	0	0	1	1	1	1
8861	532	1	1	1	1	1	1	1	1
8909	580	1	1	1	1	1	1	1	1
8937	608	0	0	0	0	1	1	1	1
8982	653	1	0	0	0	1	1	1	1
9006	677	1	1	1	1	1	1	1	1
9029	700	1	1	1	1	1	1	1	1
14880	0								
14920	40								
14960	80	1	1	1	1	1	1	1	1
15003	123	1	1	1	0	1	1	0	0
15033	153	1	1	1	1	1	1	0	0
15073	193	1	1	1	0	1	1	1	1
15100	220	1	1	1	1	1	1	1	1
15140	260	1	1	1	1	1	1	1	1
15182	302	1	1	1	1	1	1	1	1
15206	326	1	1	1	1	1	1	1	1
15312	432	0	0	0	0	0	0	0	0
15352	472	1	1	1	1	1	1	0	0
15358	478	1	1	1	1	1	1	1	1
15407	527	1	1	1	1	0	0	0	0
15431	551	1	1	1	1	0	0	0	0
15461	581	1	1	1	1	0	0	0	0
15540	660	1	1	1	1	1	0	0	0
15612	732	1	1	1	1	1	0	0	0
15685	805	1	1	1	1	1	0	0	0
15691	811	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab. 2.8 a. Mapa uszkodzeń dla zespołu pompowego nr 4 przy różnych wartościach odchylenia standardowego *s* (dla danych z tab. 2.4 a)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$m(t)_{a_{Rb}}$				$m(t)_{a_{Rc}}$			
		0,25 *s*	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***	**0,25 *s***	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***
8315	0								
8340	25								
8365	50	1	1	1	1	1	1	1	1
8437	122	1	1	0	0	0	0	0	0
8447	132	1	1	1	1	1	1	1	1
8509	194	0	0	0	0	0	0	0	0
8567	252	0	0	0	0	1	0	0	0
8591	276	1	1	1	1	1	0	0	0
8615	300	0	0	0	0	1	1	0	0
8660	345	1	0	0	0	1	0	0	0
8699	384	1	1	1	1	1	1	1	0
8735	420	0	0	0	0	1	0	0	0
8756	441	0	0	0	0	0	0	0	0
8780	465	1	1	1	1	0	0	0	0
8826	511	1	0	0	0	0	0	0	0
8850	535	1	0	0	0	0	0	0	0
8900	585	0	0	0	0	0	0	0	0
8924	609	0	0	0	0	0	0	0	0
8949	634	0	0	0	0	1	1	1	0
8995	680	0	0	0	0	1	1	0	0
9017	702	1	0	0	0	1	1	1	0
14890	0								
14930	40								
14970	80	1	1	1	1	1	1	1	1
14990	100	1	1	0	0	1	0	0	0
15020	130	0	0	0	0	1	1	1	1
15070	180	1	1	1	1	1	1	1	1
15120	230	1	1	1	1	1	1	1	1
15200	310	1	0	0	0	1	1	1	1
15247	357	0	0	0	0	0	0	0	0
15353	463	0	0	0	0	0	0	0	0
15416	526	0	0	0	0	1	1	1	1
15466	576	1	0	0	0	0	0	0	0
15472	582	1	1	1	1	1	1	1	1
15563	673	0	0	0	0	0	0	0	0
15569	679	1	1	1	1	1	1	1	1
15588	698	0	0	0	0	0	0	0	0
15606	716	0	0	0	0	1	0	0	0
15659	769	0	0	0	0	0	0	0	0
15683	793	0	0	0	0	1	1	1	1
15798	908	1	1	0	0	0	0	0	0

Tab. 2.8 b. Mapa uszkodzeń dla zespołu pompowego nr 4 przy różnych wartościach odchylenia standardowego *s* (dla danych tab. 2.4 b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$m(t)_{a_{Rb}}$				$m(t)_{a_{Rc}}$			
		0,25 *s*	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***	**0,25 *s***	**0,5 *s***	**0,75 *s***	***s***
8315	0								
8340	25								
8365	50	1	1	1	1	1	1	0	0
8437	122	1	1	1	1	0	0	0	0
8447	132	1	1	1	1	1	1	1	1
8509	194	0	0	0	0	0	0	0	0
8567	252	0	0	0	0	0	0	0	0
8591	276	1	1	1	0	0	0	0	0
8615	300	0	0	0	0	0	0	0	0
8660	345	1	0	0	0	0	0	0	0
8699	384	0	0	0	0	0	0	0	0
8735	420	0	0	0	0	0	0	0	0
8756	441	0	0	0	0	0	0	0	0
8780	465	1	1	0	0	0	0	0	0
8826	511	0	0	0	0	0	0	0	0
8850	535	1	1	1	0	0	0	0	0
8900	585	0	0	0	0	0	0	0	0
8924	609	0	0	0	0	0	0	0	0
8949	634	0	0	0	0	0	0	0	0
8995	680	0	0	0	0	1	1	1	1
9017	702	1	1	1	1	1	1	1	1
14890	0								
14930	40								
14970	80	0	0	0	0	1	1	1	1
14990	100	1	1	1	1	1	1	1	1
15020	130	0	0	0	0	1	1	1	1
15070	180	0	0	0	0	1	1	1	0
15120	230	0	0	0	0	1	1	0	0
15200	310	0	0	0	0	1	1	0	0
15247	357	1	0	0	0	0	0	0	0
15353	463	0	0	0	0	0	0	0	0
15416	526	1	0	0	0	1	1	1	1
15466	576	1	1	1	1	0	0	0	0
15472	582	1	1	1	1	1	1	1	1
15563	673	0	0	0	0	0	0	0	0
15569	679	1	1	1	1	1	1	1	1
15588	698	1	0	0	0	0	0	0	0
15606	716	0	0	0	0	1	0	0	0
15659	769	0	0	0	0	0	0	0	0
15683	793	0	0	0	0	1	0	0	0
15798	908	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 2.9 a. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.3 a) – ocena zmian wartości a_{Rb}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rbi}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{dopa_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$
8329	0	1				
8354	25	2	0,80			
8401	72	3	0,72	0,36578	2,03750	0,36578
8442	113	4	0,65	0,37120	2,03750	0,47492
8487	158	5	0,60	1,47405	2,03750	0,59471
8531	202	6	0,57	1,46197	2,03750	0,71183
8578	249	7	0,53	1,43669	2,03750	0,83695
8602	273	8	0,51	1,40481	2,03750	0,90083
8648	319	9	0,48	1,40586	2,03750	1,02329
8675	346	10	0,46	1,46899	2,03750	1,09516
8699	370	11	0,44	1,48887	2,03750	1,15905
8744	415	12	0,43	1,49799	2,03750	1,27884
8769	440	13	0,41	1,69157	2,03750	1,34538
8819	490	14	0,40	1,68335	2,03750	1,47848
8838	509	15	0,39	1,70950	2,03750	1,52906
8861	532	16	0,38	1,72761	2,03750	1,59029
8909	580	17	0,37	1,88067	2,03750	1,71806
8937	608	18	0,36	1,87080	2,03750	1,79260
8982	653	19	0,35	1,88412	2,03750	1,91239
9006	677	20	0,34	1,92680	2,03750	1,97627
9029	700	21	0,33	2,03750	2,03750	2,03750
14880	0	1				
14920	40	2	0,80			
14960	80	3	0,72	0,20137	2,17093	0,20137
15003	123	4	0,65	0,23389	2,17093	0,31722
15033	153	5	0,60	0,31409	2,17093	0,39805
15073	193	6	0,57	0,42062	2,17093	0,50583
15100	220	7	0,53	1,55795	2,17093	0,57857
15140	260	8	0,51	1,57951	2,17093	0,68635
15182	302	9	0,48	1,60004	2,17093	0,79951
15206	326	10	0,46	1,60047	2,17093	0,86418
15312	432	11	0,44	1,58092	2,17093	1,14978
15352	472	12	0,43	1,63651	2,17093	1,25755
15358	478	13	0,41	1,80520	2,17093	1,27372
15407	527	14	0,40	1,82319	2,17093	1,40574
15431	551	15	0,39	1,90150	2,17093	1,47040
15461	581	16	0,38	1,90932	2,17093	1,55123
15540	660	17	0,37	1,92513	2,17093	1,76409
15612	732	18	0,36	1,93508	2,17093	1,95808
15685	805	19	0,35	1,95469	2,17093	2,15477
15691	811	20	0,34	2,17093	2,17093	2,17093

Tab. 2.9 a'. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.4 a) – ocena zmian wartości a_{Rb}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rbi}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{dopa_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$
8329	0	1				
8354	25	2	0,80			
8401	72	3	0,72	0,01208	0,07283	0,01208
8442	113	4	0,65	0,01458	0,07283	0,01605
8487	158	5	0,60	0,01753	0,07283	0,02040
8531	202	6	0,57	0,01795	0,07283	0,02466
8578	249	7	0,53	0,01938	0,07283	0,02920
8602	273	8	0,51	0,01945	0,07283	0,03153
8648	319	9	0,48	0,02150	0,07283	0,03598
8675	346	10	0,46	0,02389	0,07283	0,03859
8699	370	11	0,44	0,02499	0,07283	0,04091
8744	415	12	0,43	0,03130	0,07283	0,04526
8769	440	13	0,41	0,04903	0,07283	0,04768
8819	490	14	0,40	0,04934	0,07283	0,05252
8838	509	15	0,39	0,05053	0,07283	0,05435
8861	532	16	0,38	0,05563	0,07283	0,05658
8909	580	17	0,37	0,05943	0,07283	0,06122
8937	608	18	0,36	0,05924	0,07283	0,06393
8982	653	19	0,35	0,06043	0,07283	0,06828
9006	677	20	0,34	0,06511	0,07283	0,07060
9029	700	21	0,33	0,07283	0,07283	0,07283
14880	0	1				
14920	40	2	0,80			
14960	80	3	0,72	0,01501	0,13428	0,01501
15003	123	4	0,65	0,01595	0,13428	0,02203
15033	153	5	0,60	0,01768	0,13428	0,02692
15073	193	6	0,57	0,01888	0,13428	0,03345
15100	220	7	0,53	0,02029	0,13428	0,03785
15140	260	8	0,51	0,02183	0,13428	0,04438
15182	302	9	0,48	0,02461	0,13428	0,05123
15206	326	10	0,46	0,03057	0,13428	0,05515
15312	432	11	0,44	0,03089	0,13428	0,07244
15352	472	12	0,43	0,03613	0,13428	0,07897
15358	478	13	0,41	0,04845	0,13428	0,07995
15407	527	14	0,40	0,05312	0,13428	0,08794
15431	551	15	0,39	0,06339	0,13428	0,09186
15461	581	16	0,38	0,06705	0,13428	0,09675
15540	660	17	0,37	0,07131	0,13428	0,10964
15612	732	18	0,36	0,07487	0,13428	0,12139
15685	805	19	0,35	0,07977	0,13428	0,13330
15691	811	20	0,34	0,13428	0,13428	0,13428

Z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.9 b. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.3 a) – ocena zmian wartości a_{Rc}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rci}	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{dopa_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$
8329	0	1				
8354	25	2	0,80			
8401	72	3	0,72	0,17896	0,87241	0,17896
8442	113	4	0,65	0,17373	0,87241	0,22423
8487	158	5	0,60	0,58635	0,87241	0,27392
8531	202	6	0,57	0,68890	0,87241	0,32250
8578	249	7	0,53	0,67892	0,87241	0,37440
8602	273	8	0,51	0,67864	0,87241	0,40090
8648	319	9	0,48	0,68991	0,87241	0,45170
8675	346	10	0,46	0,71825	0,87241	0,48151
8699	370	11	0,44	0,74206	0,87241	0,50801
8744	415	12	0,43	0,73555	0,87241	0,55770
8769	440	13	0,41	0,73291	0,87241	0,58531
8819	490	14	0,40	0,72736	0,87241	0,64052
8838	509	15	0,39	0,75186	0,87241	0,66150
8861	532	16	0,38	0,75265	0,87241	0,68690
8909	580	17	0,37	0,79763	0,87241	0,73990
8937	608	18	0,36	0,80855	0,87241	0,77082
8982	653	19	0,35	0,81862	0,87241	0,82051
9006	677	20	0,34	0,85067	0,87241	0,84701
9029	700	21	0,33	0,87241	0,87241	0,87241
14880	0	1				
14920	40	2	0,80			
14960	80	3	0,72	0,04122	1,40184	0,04122
15003	123	4	0,65	0,04703	0,87241	0,22681
15033	153	5	0,60	0,05052	0,87241	0,25496
15073	193	6	0,57	0,13862	0,87241	0,29250
15100	220	7	0,53	0,92742	0,87241	0,31783
15140	260	8	0,51	1,02232	0,87241	0,35537
15182	302	9	0,48	1,03958	0,87241	0,39478
15206	326	10	0,46	1,03159	0,87241	0,41730
15312	432	11	0,44	1,01702	0,87241	0,51677
15352	472	12	0,43	1,01162	0,87241	0,55430
15358	478	13	0,41	1,36132	0,87241	0,55993
15407	527	14	0,40	1,34962	0,87241	0,60591
15431	551	15	0,39	1,34138	0,87241	0,62843
15461	581	16	0,38	1,33204	0,87241	0,65658
15540	660	17	0,37	1,32819	0,87241	0,73071
15612	732	18	0,36	1,32477	0,87241	0,79828
15685	805	19	0,35	1,32200	0,87241	0,86678
15691	811	20	0,34	1,40184	0,87241	0,87241

Tab. 2.9 b'. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.4 a) – ocena zmian wartości a_{Rc}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rci}	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{dopa_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$
8329	0	1				
8354	25	2	0,80			
8401	72	3	0,72	0,00575	0,02546	0,00575
8442	113	4	0,65	0,00556	0,02546	0,00704
8487	158	5	0,60	0,00805	0,02546	0,00845
8531	202	6	0,57	0,00905	0,02546	0,00983
8578	249	7	0,53	0,00946	0,02546	0,01131
8602	273	8	0,51	0,01007	0,02546	0,01206
8648	319	9	0,48	0,01170	0,02546	0,01350
8675	346	10	0,46	0,01288	0,02546	0,01435
8699	370	11	0,44	0,01391	0,02546	0,01510
8744	415	12	0,43	0,01402	0,02546	0,01651
8769	440	13	0,41	0,01427	0,02546	0,01730
8819	490	14	0,40	0,01426	0,02546	0,01887
8838	509	15	0,39	0,01567	0,02546	0,01946
8861	532	16	0,38	0,01650	0,02546	0,02019
8909	580	17	0,37	0,01860	0,02546	0,02169
8937	608	18	0,36	0,01947	0,02546	0,02257
8982	653	19	0,35	0,02046	0,02546	0,02398
9006	677	20	0,34	0,02421	0,02546	0,02474
9029	700	21	0,33	0,02546	0,02546	0,02546
14880	0	1				
14920	40	2	0,80			
14960	80	3	0,72	0,00267	0,05415	0,00267
15003	123	4	0,65	0,00283	0,05415	0,00570
15033	153	5	0,60	0,00293	0,05415	0,00782
15073	193	6	0,57	0,00328	0,05415	0,01063
15100	220	7	0,53	0,00660	0,05415	0,01253
15140	260	8	0,51	0,00954	0,05415	0,01535
15182	302	9	0,48	0,01180	0,05415	0,01831
15206	326	10	0,46	0,01417	0,05415	0,02000
15312	432	11	0,44	0,01424	0,05415	0,02746
15352	472	12	0,43	0,01484	0,05415	0,03028
15358	478	13	0,41	0,03166	0,05415	0,03070
15407	527	14	0,40	0,03146	0,05415	0,03415
15431	551	15	0,39	0,03145	0,05415	0,03584
15461	581	16	0,38	0,03135	0,05415	0,03795
15540	660	17	0,37	0,03202	0,05415	0,04352
15612	732	18	0,36	0,03272	0,05415	0,04859
15685	805	19	0,35	0,03338	0,05415	0,05373
15691	811	20	0,34	0,05415	0,05415	0,05415

Z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.10 a. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 a) – ocena zmian wartości a_{Rb}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rbi}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{dopa_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$
8315	0	1				
8340	25	2	0,80			
8365	50	3	0,72	0,06695	1,70699	0,06695
8437	122	4	0,65	0,10185	1,70699	0,17402
8447	132	5	0,60	0,22726	1,70699	0,29154
8509	194	6	0,57	0,22511	1,70699	0,40645
8567	252	7	0,53	0,25817	1,70699	0,52919
8591	276	8	0,51	0,49515	1,70699	0,59187
8615	300	9	0,48	0,48809	1,70699	0,71200
8660	345	10	0,46	0,54703	1,70699	0,78251
8699	384	11	0,44	1,43539	1,70699	0,84519
8735	420	12	0,43	1,43924	1,70699	0,96270
8756	441	13	0,41	1,42694	1,70699	1,02799
8780	465	14	0,40	1,48209	1,70699	1,15857
8826	511	15	0,39	1,60927	1,70699	1,20819
8850	535	16	0,38	1,66131	1,70699	1,26825
8900	585	17	0,37	1,65616	1,70699	1,39361
8924	609	18	0,36	1,66671	1,70699	1,46673
8949	634	19	0,35	1,66101	1,70699	1,58425
8995	680	20	0,34	1,66041	1,70699	1,64693
9017	702	21	0,33	1,70699	1,70699	1,70699
14890	0	1				
14930	40	2	0,80			
14970	80	3	0,72	0,58999	7,41623	0,58999
14990	100	4	0,65	0,56627	7,41623	0,99154
15020	130	5	0,60	0,53570	7,41623	1,27169
15070	180	6	0,57	2,40592	7,41623	1,64521
15120	230	7	0,53	3,31259	7,41623	1,89735
15200	310	8	0,51	3,45421	7,41623	2,27087
15247	357	9	0,48	3,42149	7,41623	2,66308
15353	463	10	0,46	3,38624	7,41623	2,88720
15416	526	11	0,44	3,35043	7,41623	3,87705
15466	576	12	0,43	3,40447	7,41623	4,25058
15472	582	13	0,41	3,85760	7,41623	4,30661
15563	673	14	0,40	3,85483	7,41623	4,76418
15569	679	15	0,39	3,89600	7,41623	4,98830
15588	698	16	0,38	3,88534	7,41623	5,26844
15606	716	17	0,37	3,86432	7,41623	6,00616
15659	769	18	0,36	3,85461	7,41623	6,67851
15683	793	19	0,35	3,84667	7,41623	7,36020
15798	908	20	0,34	7,41623	7,41623	7,41623

Tab. 2.10 a'. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 b) – ocena zmian wartości a_{Rb}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rbi}	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{dopa_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$
8315	0	1				
8340	25	2	0,80			
8365	50	3	0,72	0,00405	0,16748	0,00405
8437	122	4	0,65	0,00768	0,16748	0,02210
8447	132	5	0,60	0,10138	0,16748	0,02461
8509	194	6	0,57	0,09727	0,16748	0,04015
8567	252	7	0,53	0,09900	0,16748	0,05469
8591	276	8	0,51	0,11540	0,16748	0,06070
8615	300	9	0,48	0,11321	0,16748	0,06672
8660	345	10	0,46	0,11680	0,16748	0,07800
8699	384	11	0,44	0,11878	0,16748	0,08777
8735	420	12	0,43	0,12122	0,16748	0,09679
8756	441	13	0,41	0,12054	0,16748	0,10206
8780	465	14	0,40	0,13090	0,16748	0,10807
8826	511	15	0,39	0,13260	0,16748	0,11960
8850	535	16	0,38	0,14311	0,16748	0,12562
8900	585	17	0,37	0,14353	0,16748	0,13815
8924	609	18	0,36	0,14615	0,16748	0,14417
8949	634	19	0,35	0,14589	0,16748	0,15043
8995	680	20	0,34	0,14650	0,16748	0,16196
9017	702	21	0,33	0,16748	0,16748	0,16748
14890	0	1				
14930	40	2	0,80			
14970	80	3	0,72	0,08051	0,20173	0,08051
14990	100	4	0,65	0,09582	0,20173	0,08343
15020	130	5	0,60	0,09364	0,20173	0,08783
15070	180	6	0,57	0,09436	0,20173	0,09515
15120	230	7	0,53	0,09378	0,20173	0,10247
15200	310	8	0,51	0,09288	0,20173	0,11418
15247	357	9	0,48	0,09571	0,20173	0,12106
15353	463	10	0,46	0,09520	0,20173	0,13658
15416	526	11	0,44	0,09786	0,20173	0,14580
15466	576	12	0,43	0,11617	0,20173	0,15312
15472	582	13	0,41	0,14917	0,20173	0,15400
15563	673	14	0,40	0,15108	0,20173	0,16732
15569	679	15	0,39	0,19593	0,20173	0,16820
15588	698	16	0,38	0,19931	0,20173	0,17099
15606	716	17	0,37	0,19931	0,20173	0,17362
15659	769	18	0,36	0,19984	0,20173	0,18138
15683	793	19	0,35	0,20181	0,20173	0,18489
15798	908	20	0,34	0,20173	0,20173	0,20173

Z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.10 b. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 a) – ocena zmian wartości a_{Rc}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rci}	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{dopa_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$
8315	0	1				
8340	25	2	0,80			
8365	50	3	0,72	0,20336	0,31742	0,20336
8437	122	4	0,65	0,19349	0,31742	0,21080
8447	132	5	0,60	0,19404	0,31742	0,21898
8509	194	6	0,57	0,19758	0,31742	0,22697
8567	252	7	0,53	0,20901	0,31742	0,23551
8591	276	8	0,51	0,21679	0,31742	0,23986
8615	300	9	0,48	0,22183	0,31742	0,24822
8660	345	10	0,46	0,23286	0,31742	0,25312
8699	384	11	0,44	0,26329	0,31742	0,25748
8735	420	12	0,43	0,26700	0,31742	0,26566
8756	441	13	0,41	0,26522	0,31742	0,27020
8780	465	14	0,40	0,26356	0,31742	0,27928
8826	511	15	0,39	0,27582	0,31742	0,28273
8850	535	16	0,38	0,27506	0,31742	0,28691
8900	585	17	0,37	0,27402	0,31742	0,29563
8924	609	18	0,36	0,27281	0,31742	0,30071
8949	634	19	0,35	0,28094	0,31742	0,30889
8995	680	20	0,34	0,30288	0,31742	0,31325
9017	702	21	0,33	0,31742	0,31742	0,31742
14890	0	1				
14930	40	2	0,80			
14970	80	3	0,72	0,02476	1,25668	0,02476
14990	100	4	0,65	0,02287	0,31742	0,21123
15020	130	5	0,60	0,03895	0,31742	0,21586
15070	180	6	0,57	0,06280	0,31742	0,22203
15120	230	7	0,53	0,10063	0,31742	0,22620
15200	310	8	0,51	0,13200	0,31742	0,23237
15247	357	9	0,48	0,13127	0,31742	0,23886
15353	463	10	0,46	0,13627	0,31742	0,24256
15416	526	11	0,44	0,13919	0,31742	0,25892
15466	576	12	0,43	0,13943	0,31742	0,26510
15472	582	13	0,41	0,91485	0,31742	0,26602
15563	673	14	0,40	0,92469	0,31742	0,27359
15569	679	15	0,39	1,03389	0,31742	0,27729
15588	698	16	0,38	1,02544	0,31742	0,28192
15606	716	17	0,37	1,03086	0,31742	0,29412
15659	769	18	0,36	1,04972	0,31742	0,30523
15683	793	19	0,35	1,23472	0,31742	0,31650
15798	908	20	0,34	1,25668	0,31742	0,31742

Tab. 2.10 b'. Twierdzenie Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.4 b) – ocena zmian wartości a_{Rc}

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	a_{Rci}	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{dopa_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$
8315	0	1				
8340	25	2	0,80			
8365	50	3	0,72	0,00650	0,03924	0,00650
8437	122	4	0,65	0,00677	0,03924	0,01011
8447	132	5	0,60	0,01699	0,03924	0,01062
8509	194	6	0,57	0,01841	0,03924	0,01373
8567	252	7	0,53	0,02017	0,03924	0,01664
8591	276	8	0,51	0,02137	0,03924	0,01785
8615	300	9	0,48	0,02404	0,03924	0,01905
8660	345	10	0,46	0,02473	0,03924	0,02131
8699	384	11	0,44	0,02554	0,03924	0,02327
8735	420	12	0,43	0,02618	0,03924	0,02508
8756	441	13	0,41	0,02605	0,03924	0,02613
8780	465	14	0,40	0,02593	0,03924	0,02734
8826	511	15	0,39	0,02586	0,03924	0,02965
8850	535	16	0,38	0,02586	0,03924	0,03085
8900	585	17	0,37	0,02580	0,03924	0,03336
8924	609	18	0,36	0,02570	0,03924	0,03457
8949	634	19	0,35	0,02747	0,03924	0,03582
8995	680	20	0,34	0,03062	0,03924	0,03813
9017	702	21	0,33	0,03924	0,03924	0,03924
14890	0	1				
14930	40	2	0,80			
14970	80	3	0,72	0,00279	0,07586	0,00279
14990	100	4	0,65	0,00299	0,07586	0,00455
15020	130	5	0,60	0,01006	0,07586	0,00720
15070	180	6	0,57	0,01163	0,07586	0,01161
15120	230	7	0,53	0,01306	0,07586	0,01603
15200	310	8	0,51	0,01397	0,07586	0,02309
15247	357	9	0,48	0,01388	0,07586	0,02723
15353	463	10	0,46	0,01403	0,07586	0,03659
15416	526	11	0,44	0,01586	0,07586	0,04215
15466	576	12	0,43	0,01602	0,07586	0,04656
15472	582	13	0,41	0,04486	0,07586	0,04709
15563	673	14	0,40	0,04575	0,07586	0,05512
15569	679	15	0,39	0,07170	0,07586	0,05565
15588	698	16	0,38	0,07135	0,07586	0,05733
15606	716	17	0,37	0,07438	0,07586	0,05892
15659	769	18	0,36	0,07430	0,07586	0,06359
15683	793	19	0,35	0,07613	0,07586	0,06571
15798	908	20	0,34	0,07586	0,07586	0,07586

Z uwzględnieniem warunków początkowych.

Tab. 2.11 a. Mapa uszkodzeń wg twierdzenia Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.9 a i b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8329	0	1						
8354	25	2						
8401	72	3	0,36578	0,36578	0,17896	0,17896	1	1
8442	113	4	0,37120	0,47492	0,17373	0,22423	0	0
8487	158	5	1,47405	0,59471	0,58635	0,27392	1	1
8531	202	6	1,46197	0,71183	0,68890	0,32250	1	1
8578	249	7	1,43669	0,83695	0,67892	0,37440	1	1
8602	273	8	1,40481	0,90083	0,67864	0,40090	1	1
8648	319	9	1,40586	1,02329	0,68991	0,45170	1	1
8675	346	10	1,46899	1,09516	0,71825	0,48151	1	1
8699	370	11	1,48887	1,15905	0,74206	0,50801	1	1
8744	415	12	1,49799	1,27884	0,73555	0,55770	1	1
8769	440	13	1,69157	1,34538	0,73291	0,58531	1	1
8819	490	14	1,68335	1,47848	0,72736	0,64052	1	1
8838	509	15	1,70950	1,52906	0,75186	0,66150	1	1
8861	532	16	1,72761	1,59029	0,75265	0,68690	1	1
8909	580	17	1,88067	1,71806	0,79763	0,73990	1	1
8937	608	18	1,87080	1,79260	0,80855	0,77082	1	1
8982	653	19	1,88412	1,91239	0,81862	0,82051	0	0
9006	677	20	1,92680	1,97627	0,85067	0,84701	0	1
9029	700	21	2,03750	2,03750	0,87241	0,87241	1	1
14880	0	1						
14920	40	2						
14960	80	3	0,20137	0,20137	0,04122	0,04122	1	1
15003	123	4	0,23389	0,31722	0,04703	0,22681	0	0
15033	153	5	0,31409	0,39805	0,05052	0,25496	0	0
15073	193	6	0,42062	0,50583	0,13862	0,29250	0	0
15100	220	7	1,55795	0,57857	0,92742	0,31783	1	1
15140	260	8	1,57951	0,68635	1,02232	0,35537	1	1
15182	302	9	1,60004	0,79951	1,03958	0,39478	1	1
15206	326	10	1,60047	0,86418	1,03159	0,41730	1	1
15312	432	11	1,58092	1,14978	1,01702	0,51677	1	1
15352	472	12	1,63651	1,25755	1,01162	0,55430	1	1
15358	478	13	1,80520	1,27372	1,36132	0,55993	1	1
15407	527	14	1,82319	1,40574	1,34962	0,60591	1	1
15431	551	15	1,90150	1,47040	1,34138	0,62843	1	1
15461	581	16	1,90932	1,55123	1,33204	0,65658	1	1
15540	660	17	1,92513	1,76409	1,32819	0,73071	1	1
15612	732	18	1,93508	1,95808	1,32477	0,79828	0	1
15685	805	19	1,95469	2,15477	1,32200	0,86678	0	1
15691	811	20	2,17093	2,17093	1,40184	0,87241	1	1

Tab. 2.11 a'. Mapa uszkodzeń wg twierdzenia Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 3 (dla danych z tab. 2.9 a' i b')

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8329	0	1						
8354	25	2						
8401	72	3	0,01208	0,01208	0,00575	0,00575	1	1
8442	113	4	0,01458	0,01605	0,00556	0,00704	0	0
8487	158	5	0,01753	0,02040	0,00805	0,00845	0	0
8531	202	6	0,01795	0,02466	0,00905	0,00983	0	0
8578	249	7	0,01938	0,02920	0,00946	0,01131	0	0
8602	273	8	0,01945	0,03153	0,01007	0,01206	0	0
8648	319	9	0,02150	0,03598	0,01170	0,01350	0	0
8675	346	10	0,02389	0,03859	0,01288	0,01435	0	0
8699	370	11	0,02499	0,04091	0,01391	0,01510	0	0
8744	415	12	0,03130	0,04526	0,01402	0,01651	0	0
8769	440	13	0,04903	0,04768	0,01427	0,01730	1	0
8819	490	14	0,04934	0,05252	0,01426	0,01887	0	0
8838	509	15	0,05053	0,05435	0,01567	0,01946	0	0
8861	532	16	0,05563	0,05658	0,01650	0,02019	0	0
8909	580	17	0,05943	0,06122	0,01860	0,02169	0	0
8937	608	18	0,05924	0,06393	0,01947	0,02257	0	0
8982	653	19	0,06043	0,06828	0,02046	0,02398	0	0
9006	677	20	0,06511	0,07060	0,02421	0,02474	0	0
9029	700	21	0,07283	0,07283	0,02546	0,02546	1	1
14880	0	1						
14920	40	2						
14960	80	3	0,01501	0,01501	0,00267	0,00267	1	1
15003	123	4	0,01595	0,02203	0,00283	0,00570	0	0
15033	153	5	0,01768	0,02692	0,00293	0,00782	0	0
15073	193	6	0,01888	0,03345	0,00328	0,01063	0	0
15100	220	7	0,02029	0,03785	0,00660	0,01253	0	0
15140	260	8	0,02183	0,04438	0,00954	0,01535	0	0
15182	302	9	0,02461	0,05123	0,01180	0,01831	0	0
15206	326	10	0,03057	0,05515	0,01417	0,02000	0	0
15312	432	11	0,03089	0,07244	0,01424	0,02746	0	0
15352	472	12	0,03613	0,07897	0,01484	0,03028	0	0
15358	478	13	0,04845	0,07995	0,03166	0,03070	0	1
15407	527	14	0,05312	0,08794	0,03146	0,03415	0	0
15431	551	15	0,06339	0,09186	0,03145	0,03584	0	0
15461	581	16	0,06705	0,09675	0,03135	0,03795	0	0
15540	660	17	0,07131	0,10964	0,03202	0,04352	0	0
15612	732	18	0,07487	0,12139	0,03272	0,04859	0	0
15685	805	19	0,07977	0,13330	0,03338	0,05373	0	0
15691	811	20	0,13428	0,13428	0,05415	0,05415	1	1

Tab. 2.11 b. Mapa uszkodzeń wg twierdzenia Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.10 a i b)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8315	0	1						
8340	25	2						
8365	50	3	0,06695	0,06695	0,20336	0,20336	1	1
8437	122	4	0,10185	0,17402	0,19349	0,21080	0	0
8447	132	5	0,22726	0,29154	0,19404	0,21898	1	1
8509	194	6	0,22511	0,40645	0,19758	0,22697	1	1
8567	252	7	0,25817	0,52919	0,20901	0,23551	1	1
8591	276	8	0,49515	0,59187	0,21679	0,23986	1	1
8615	300	9	0,48809	0,71200	0,22183	0,24822	1	1
8660	345	10	0,54703	0,78251	0,23286	0,25312	1	1
8699	384	11	1,43539	0,84519	0,26329	0,25748	1	1
8735	420	12	1,43924	0,96270	0,26700	0,26566	1	1
8756	441	13	1,42694	1,02799	0,26522	0,27020	1	1
8780	465	14	1,48209	1,15857	0,26356	0,27928	1	1
8826	511	15	1,60927	1,20819	0,27582	0,28273	1	1
8850	535	16	1,66131	1,26825	0,27506	0,28691	1	0
8900	585	17	1,65616	1,39361	0,27402	0,29563	1	0
8924	609	18	1,66671	1,46673	0,27281	0,30071	1	0
8949	634	19	1,66101	1,58425	0,28094	0,30889	1	0
8995	680	20	1,66041	1,64693	0,30288	0,31325	1	0
9017	702	21	1,70699	1,70699	0,31742	0,31742	1	1
14890	0	1						
14930	40	2						
14970	80	3	0,58999	0,58999	0,02476	0,02476	1	1
14990	100	4	0,56627	0,99154	0,02287	0,21123	0	0
15020	130	5	0,53570	1,27169	0,03895	0,21586	0	0
15070	180	6	2,40592	1,64521	0,06280	0,22203	1	0
15120	230	7	3,31259	1,89735	0,10063	0,22620	1	0
15200	310	8	3,45421	2,27087	0,13200	0,23237	1	0
15247	357	9	3,42149	2,66308	0,13127	0,23886	1	0
15353	463	10	3,38624	2,88720	0,13627	0,24256	1	0
15416	526	11	3,35043	3,87705	0,13919	0,25892	1	0
15466	576	12	3,40447	4,25058	0,13943	0,26510	1	0
15472	582	13	3,85760	4,30661	0,91485	0,26602	1	1
15563	673	14	3,85483	4,76418	0,92469	0,27359	1	1
15569	679	15	3,89600	4,98830	1,03389	0,27729	1	1
15588	698	16	3,88534	5,26844	1,02544	0,28192	1	1
15606	716	17	3,86432	6,00616	1,03086	0,29412	1	1
15659	769	18	3,85461	6,67851	1,04972	0,30523	1	1
15683	793	19	3,84667	7,36020	1,23472	0,31650	1	1
15798	908	20	7,41623	7,41623	1,25668	0,31742	1	1

Tab. 2.11 b'. Mapa uszkodzeń wg twierdzenia Lindeberga – Levy'ego dla zespołu pompowego nr 4 (dla danych z tab. 2.10 a' i b')

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	i	$d_{pra_{Rb}}$	$d_{prdopa_{Rb}}$	$d_{pra_{Rc}}$	$d_{prdopa_{Rc}}$	$m(t)_{a_{Rb}}$	$m(t)_{a_{Rc}}$
8315	0	1						
8340	25	2						
8365	50	3	0,00405	0,00405	0,00650	0,00650	1	1
8437	122	4	0,00768	0,02210	0,00677	0,01011	0	0
8447	132	5	0,10138	0,02461	0,01699	0,01062	1	1
8509	194	6	0,09727	0,04015	0,01841	0,01373	1	1
8567	252	7	0,09900	0,05469	0,02017	0,01664	1	1
8591	276	8	0,11540	0,06070	0,02137	0,01785	1	1
8615	300	9	0,11321	0,06672	0,02404	0,01905	1	1
8660	345	10	0,11680	0,07800	0,02473	0,02131	1	1
8699	384	11	0,11878	0,08777	0,02554	0,02327	1	1
8735	420	12	0,12122	0,09679	0,02618	0,02508	1	1
8756	441	13	0,12054	0,10206	0,02605	0,02613	1	0
8780	465	14	0,13090	0,10807	0,02593	0,02734	1	0
8826	511	15	0,13260	0,11960	0,02586	0,02965	1	0
8850	535	16	0,14311	0,12562	0,02586	0,03085	1	0
8900	585	17	0,14353	0,13815	0,02580	0,03336	1	0
8924	609	18	0,14615	0,14417	0,02570	0,03457	1	0
8949	634	19	0,14589	0,15043	0,02747	0,03582	0	0
8995	680	20	0,14650	0,16196	0,03062	0,03813	0	0
9017	702	21	0,16748	0,16748	0,03924	0,03924	1	1
14890	0	1						
14930	40	2						
14970	80	3	0,08051	0,08051	0,00279	0,00279	1	1
14990	100	4	0,09582	0,08343	0,00299	0,00455	1	0
15020	130	5	0,09364	0,08783	0,01006	0,00720	1	1
15070	180	6	0,09436	0,09515	0,01163	0,01161	0	1
15120	230	7	0,09378	0,10247	0,01306	0,01603	0	0
15200	310	8	0,09288	0,11418	0,01397	0,02309	0	0
15247	357	9	0,09571	0,12106	0,01388	0,02723	0	0
15353	463	10	0,09520	0,13658	0,01403	0,03659	0	0
15416	526	11	0,09786	0,14580	0,01586	0,04215	0	0
15466	576	12	0,11617	0,15312	0,01602	0,04656	0	0
15472	582	13	0,14917	0,15400	0,04486	0,04709	0	0
15563	673	14	0,15108	0,16732	0,04575	0,05512	0	0
15569	679	15	0,19593	0,16820	0,07170	0,05565	1	1
15588	698	16	0,19931	0,17099	0,07135	0,05733	1	1
15606	716	17	0,19931	0,17362	0,07438	0,05892	1	1
15659	769	18	0,19984	0,18138	0,07430	0,06359	1	1
15683	793	19	0,20181	0,18489	0,07613	0,06571	1	1
15798	908	20	0,20173	0,20173	0,07586	0,07586	1	1

2.6. Podsumowanie

Problem wyznaczania charakterystyk niezawodnościowych dla każdego pojedynczego obiektu na podstawie liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych (przed wystąpieniem uszkodzeń katastroficznych) jest ciągle otwarty. Jego rozwiązanie w dużej mierze zależy od sposobu identyfikacji liczby uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, co jest szczególnie trudne, gdy dysponuje się stosunkowo krótkim czasem obserwacji, a stąd małą liczbą uszkodzeń. Najczęściej próg diagnostyczny i fakt przekroczenia progu diagnostycznego (uszkodzenie) wyznaczone są na podstawie statystycznej obróbki otrzymanych pomiarów. Progi $\bar{x} + 0{,}25s$, $\bar{x} + 0{,}25s$, $\bar{x} + 0{,}75s$, $\bar{x} + s$ (gdzie $\bar{x}$ – statystyka średniej pomiarów, s – statystyka odchylenia) są nieprecyzyjne, bo bazują tylko na prostych obliczeniach statystycznych. Kolejny próg wyznaczony na bazie twierdzenia Lindeberga – Levy'ego (2.17 i 2.19) jest precyzyjniejszy, bo uwzględnia dodatkowe informacje, takie jak: dla początku użytkowania obiektu (dla θ_0) zużycie wynosi zawsze poniżej wartości dopuszczalnej, dla resursu θ_{max} zużycie określone metodami bezpośrednimi wynosi d_{dop}. Zatem tak wyznaczone uszkodzenia będą dokładniej zidentyfikowane.

Zbiory uszkodzeń wyznaczone dla różnych progów diagnostycznych są podstawą do wyznaczenia różnych wariantów charakterystyk i parametrów niezawodnościowych o ograniczonej wartości ilościowej, ale dużej wartości jakościowej. Pozwolą one analizować tylko (czy aż) zmiany charakterystyki wyznaczonej dla różnych obiektów i różnych czasów obserwacji kolejnych obiektów. Zatem obsługa techniczna otrzyma cenną informację pozwalającą lepiej organizować proces eksploatacji dla każdego obiektu technicznego (inaczej zespół pompowy nr 3 względem zespołu pompowego nr 4, inaczej podczas pierwszego okresu obserwacji, inaczej podczas drugiego). Badanie zmian różnych charakterystyk jest podejściem diagnostycznym, które bezpośrednio może być zastosowane w badaniach niezawodności obiektów [2, 3, 8, 23, 25].

2.7. Spis literatury

1. Bobrowski D.: *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1985.
2. Boliński B., Stelmaszczyk Z.: *Eksploatacja silników turbinowych*, WKŁ, Warszawa 1981.
3. Borgoń J., Jaźwiński J., Klimaszewski S., Żmudziński Z., Żurek J.: *Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów*, Wyd. ASKON, Warszawa 1998.
4. Grądzki R., Lindstedt P.: *Method of assessment technical object aptitude in environment of exploatation and service conditions*, "Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability" 2015, vol. 17(1).
5. Cempel. C.: *Teoria i inżyniera systemów*, Wyd. Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacyjnej PIB, Poznań 2006.
6. Grądzki R., Lindstedt P., Golak K.: *Permises of evaluation of the technical object suitability with including the quality of its maintentance and operation and their initial conditions*, "Safety and Reliability: Methodology and Applications" 2015, chapter 44.
7. Lewitowicz J., Kustroń K.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, t. 2, Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
8. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wyd. ASKON, Warszawa 2002.
9. Lindstedt P.: *Praktyczna regulacja maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wyd. ITWL, Warszawa 2010.
10. Lindstedt P.: *The method of complex worthiness assessment of an engineering object in the process of its use and service*, "Solid State Phenomena", vol. 144, Trans Tech Publications, Switzerland 2008.
11. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: *Badanie możliwości kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania na podstawie informacji uzyskanej z metod funkcjonalnej, tribologicznej i wibroakustycznej*, Projekt badawczy KBN nr 5T12D01122, sprawozdanie ITWL nr 1371/50, Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
12. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: *Sterowanie procesem użytkowania turbinowego silnika śmigłowcowego na podstawie kompleksowych sygnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia*, 8 Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'2005, Wyd. ITWL, Warszawa 2005.
13. Lindstedt P.: *Kompleksowa diagnostyka w procesie oceny jakości użytkowania silnika śmigłowcowego w inżynieryjno-lotniczym otoczeniu*, „Diagnostyka" 2006, nr 3(39).
14. Lindstedt P., Sudakowski T.: *Possibilities of assessment of reliability of an anthropotechnical system*, "Journal of Vibroengineering" 2007, Vol. 9, No 4.
15. Lindstedt P., Sudakowski T.: *The method of assessment of suitability of the bearing system based on parameters of technical and adjustment state*, The

8th International Conference Mechatronic Systems And Materials, Abstract Book, Bialystok July 8–13, 2012; "Solid State Phenomena", Mechatronic Systems and Materials V, 2013.
16. Lindstedt P., Sudakowski T.: *The assessment of object usability on the basis of instantaneous values of technical condition and regulation state parameters*, "Journal of KONES", vol. 19, no. 2, Warsaw 2012.
17. Lindstedt P., Sudakowski T., Grądzki R.: *Prediction of estimates of technical object's reliability on the basis of damage determined from Lindeberg Levy's claim and multiplicity of the set specified from ergodicity stream damage*, "Journal of KONES", vol. 20, no. 1, 2013.
18. Mańczak K.: *Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania*, WNT, Warszawa 1971.
19. Sołodownikow W.W.: *Dynamika statystyczna liniowych układów sterowania autonomicznego*, WNT, Warszawa 1964.
20. Sotskow B.S.: *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*, WNT, Warszawa 1973.
21. Sudakowski T.: *Premises of operational method of calculation of reliability of machines on the base of parametric and momentary symptoms of damage*, "Acta Mechanica et Automatica" 2009, Vol. 3, No 4.
22. Sudakowski T.: *Predykcja charakterystyk niezawodnościowych obiektu technicznego na podstawie eksploatacyjnych symptomów uszkodzeń parametrycznych i chwilowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 2010.
23. Zamojski W.: *Niezawodność i eksploatacja systemów*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1981.
24. Zboiński M., Lindstedt P., Kotlarz I.: *Stałe i aktualizowane statystyczne progi diagnostyczne i ich znaczenie w procesie bieżącej oceny stanu technicznego układu łożyskowania silnika lotniczego*, „Journal of KONBIN", no. 1(17)2011, Wyd. ITWL, Warszawa 2011.
25. Żurek J.: *Podstawy bezpieczeństwa w lotnictwie*, „Przegląd WLOP" 12/2001, Wyd. EMPA, Poznań 2001.

3

NIEZAWODNOŚĆ W TECHNICE

3.1. Charakterystyki niezawodnościowe obiektu

Niezawodność jest jednym z najważniejszych, często niedocenianych zagadnień w eksploatacji obiektów technicznych. Dotyczy wszystkich maszyn, w tym elementów i urządzeń automatyki. Określa stan zdatności lub niezdatności obiektu technicznego, który to jest ściśle powiązany z czasem i liczbą pojawiających się uszkodzeń.

Praktycznie rzecz biorąc, opis podatności obiektów na uszkodzenie można sprowadzić do określenia charakterystyk niezawodnościowych obiektu. Typowe charakterystyki niezawodności (zawodności) obiektu opisane są w PN zdeterminowanymi wskaźnikami niezawodności określającymi znajdowanie się obiektu w jednoznacznie zdeterminowanym stanie zdatności lub niezdatności [1, 2, 3, 4, 11, 15, 17, 18]. Są to:

Funkcja niezawodności:

$$R(t) = P(T \geq t) \tag{3.1}$$

$P(T \geq t)$ – prawdopodobieństwo, że obiekt nie jest uszkodzony do chwili zmiennej losowej T, T – zmienna losowa określająca czas przebywania obiektu w stanie zdatności.

Funkcja zawodności:

$$F(t) = P(T \leq t) \tag{3.2}$$

$P(T < t)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia, że obiekt w przedziale czasu $(0, t>$ ulegnie uszkodzeniu.

Z definicji funkcji niezawodności *R(t)* i zawodności *F(t)* wynika, że:

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{3.3}$$

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{3.4}$$

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{3.5}$$

Funkcja intensywności uszkodzeń (funkcja ryzyka):

$$\lambda = -\frac{d \ln R(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)}\frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{3.6}$$

Funkcja wiodąca:

$$\Lambda(t) = -\ln R(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \tag{3.7}$$

Wartość oczekiwana czasu zdatności obiektu (do pierwszego uszkodzenia):

$$\theta = E(T) = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \tag{3.8}$$

Moment zwyczajny 2. rzędu czasu zdatności:

$$E(T^2) = \int_0^\infty t^2 f(t) dt = 2\int_0^\infty t R(t) dt \tag{3.9}$$

Wariancja czasu zdatności:

$$VT = E(T^2) - [E(T)]^2 \tag{3.10}$$

Standardowe odchylenie czasu zdatności:

$$\sigma_{E(T)} = \sqrt{VT} \tag{3.11}$$

Kwantyl rzędu *p* czasu zdatności:

$$F(t_p) = p \tag{3.12}$$

Kwantyl rzędu p = 0,5 nazywa się medianą, a rzędu 0,25 i 0,75 kwartylem (odpowiednio dolnym i górnym). Z zależności $F(t_p)=p$ otrzymuje się informację, że w określonym procencie populacji (np. p=25%) uszkodzenie pojawi się już po czasie $T \geq t_p$ godzin (lat) (gdzie T – zmienna losowa dowolnego czasu, względem którego rozpatruje się prawdopodobieństwo zaistnienia uszkodzenia obiektu).

Producent maszyny z wymienionych charakterystyk niezawodności do systemu eksploatacji zawsze podaje charakterystykę intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ (wartość średnią, odchylenie górne i dolne), a także oczekiwany czas życia maszyny *E(T)*. Wartości $\lambda(t)$ dla typowych maszyn i elementów typowych maszyn przedstawiono w tab. 3.2.

Zgodnie z PN-77/N-04005 w procesie eksploatacji wyznacza się punktowe estymatory, które są podstawą do wyznaczenia charakterystyk (wskaźników) niezawodności. Są to:

$$R^*(t) = \frac{n(t)}{n} \tag{3.13 por. 3.1}$$

$$F^*(t) = \frac{m(t)}{n} \tag{3.14 por. 3.2}$$

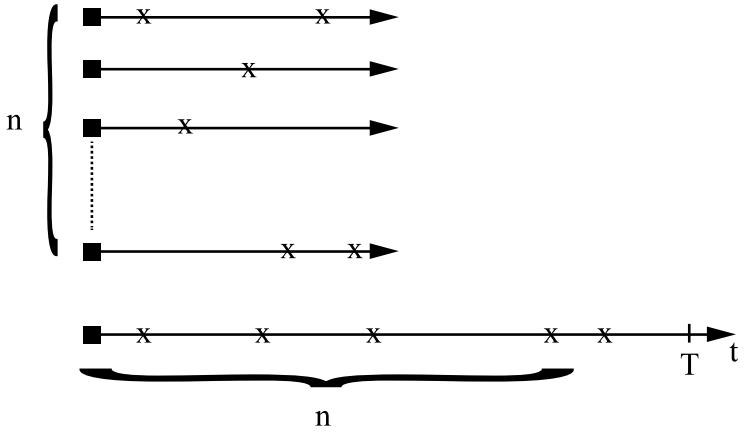
$$f^*(t) = \frac{\Delta m}{n\Delta t} \tag{3.15 por. 3.5}$$

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{\Delta t n(t)} \tag{3.16 por. 3.6}$$

$$\theta^* = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} t_i \tag{3.17 por. 3.7}$$

gdzie: *n(t)* – liczba obiektów, które w przedziale czasu <*0;t*> nie uszkodziły się; *m(t)* – liczba obiektów, które w przedziale czasu <*0;t*> uszkodziły się; *n* – liczba obiektów; *n(t+Δt)* – liczba obiektów, które w przedziale czasu <*t, t+Δt*> nie uszkodziły się; *Δt* – przedział czasu; *t* – czas, w którym nastąpiło uszkodzenie obiektu.

Strumień uszkodzeń jest ergodyczny. Oznacza to, że zbiór (liczba) wszystkich obiektów *n*, w którym mogą powstać uszkodzenia, można zastąpić dostatecznie długim czasem obserwacji *T* wybranego pojedynczego obiektu (rys. 3.1) [10].



Rys. 3.1. Ilustracja ergodyczności strumienia uszkodzeń

Bazując na wzorze (3.16), można zapisać:

$$\lambda^*(t) = \frac{n - n(t + \Delta t)}{n\Delta t} = \frac{\Delta m(t)}{n\Delta t} \tag{3.18}$$

a następnie, że:

$$n = \frac{\Delta m(t)}{\lambda^*(t)\Delta t} \cong \frac{\Delta m(t)}{\lambda(t)_{śr}\Delta t} \tag{3.19}$$

gdzie w danym przypadku: $\Delta m(t)$ – przyrost uszkodzeń w czasie Δt, $\lambda(t)_{śr}$ – intensywność uszkodzeń (podana przez producenta – tab. 3.1).

Bazując na wzorze (3.17), można zapisać:

$$\theta_{śr} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \cong \frac{\theta_{obs}}{n} \tag{3.20}$$

a następnie, że:

$$n = \frac{\theta_{obs}}{\Delta\theta_{śr}} \tag{3.21}$$

gdzie: θ_{obs} – czas obserwacji obiektu wynikający z procedur organizacji obsługi, $\Delta\theta_{śr}$ – średni czas życia między uszkodzeniami.

Dla wyznaczonych (bez trudności) estymatorów (punktów) należy ustalić (wybrać) odpowiednią postać funkcji niezawodności *R(t), F(t), f(t), λ(t), E(T),* wg zaleceń przedstawionych w normie PN-79/N-04031 (tab. 3.2).

Problem oceny niezawodności sprowadza się zatem do wyboru takiej podstawowej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa uszkodzeń, wskaźnika niezawodności (wykładniczego, Weibulla, normalnego i logarytmiczno-normalnego), który biegnie najbliżej ich estymatorów.

W teorii niezawodności szczególnego znaczenia nabierają funkcje *f(t)* i *F(t)* oraz parametry *E(T)* i odchylenia standardowe $\sigma_{E(T)}$.

Analityczne postacie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa uszkodzeń pozwalają na szeroką jakościową i ilościową analizę procesów niezawodnościowych w obsłudze technicznej maszyn [6, 8, 13, 17, 24].

Tab. 3.1. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Akumulatory	M	19,3	7,2	0,40
Akumulatory	G	21,4	2,8	0,35
Rozruszniki (startery)	G	13,7	5,1	0,35
Rozruszniki urządzeń stymulujących	G	33,6	12,5	0,86
Rozruszniki rzadkiego wykorzystania	G	9,6	3,6	0,17
Rozruszniki częstego wykorzystania	G	18,5	6,9	0,60
Adaptery	G	6,53	2,437	0,01
Adaptery dla bardzo szybkich zapisów	M	9,31	3,475	0,189
Adaptery dla bardzo szybkich zapisów	G	12,3	5,2	0,8
Prądnice prądu zmiennego	G	2,94	0,7	0,033
Antena	M	3,52	2,0	0,48
Antena	G	3,52	0,36	0,2
Antena ruchoma	G	10,04	5,7	1,36
Tłumiki regulowane	G	1,3	0,6	0,15
Baterie ładowane	G	14,29	1,4	0,5
Baterie suche	G	—	—	—
Trzymaki szczotek	G	1,11	0,1	0,04
Izolatory przepustowe	G	0,08	0,05	0,02
Brzęczki	G	1,30	0,60	0,05
Kable	G	0,170	0,02	0,002
Kondensatory o stałej pojemności do 600 V	G	0,018	0,01	0,001
Kondensatory o stałej pojemności powyżej 600 V	G	0,486	0,2	0,02 0,1325
Kondensatory o stałej pojemności powyżej 1000 V	G	2,385	1,325	1,325
Kondensatory ceramiczne	G	0,213	0,1	0,063
Kondensatory ceramiczne do 600 V	G	0,133	0,0625	0,040
Kondensatory elektrolityczne	G	0,054	0,035	0,003 0,018
Kondensatory mikowe	G	0,132	0,075	0,075
Kondensatory mikowe do 600 V	G	0,066	0,0375	0,009
Kondensatory mikowe	G	0,057	0,03	0,003
Kondensatory mikowe dla częstotliwości akustycznej	G	0,076	0,045	0,014
Kondensatory mikowe srebrzone	G	0,141	0,083	0,025

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Kondensatory olejowe	G	0,48	0,30	0,12
Kondensatory papierowe	G	0,034	0,025	0,016 0,01
Kondensatory papierowe do 600 V	G	0,04	0,0125	0,0125
Kondensatory porcelanowe (o podwyższonej niezawodności)	G	1,0	0,09	0,04
Kondensatory tantalowe	G	0,83	0,600	0,27
Kondensatory tantalowe niespolaryzowane	G	2,00	0,100	0,08
Kondensatory tantalowe spolaryzowane	G	2,90	0,100	0,075 0,001
Kondensatory tantalowe suche	G	0,05	0,165	0,165
Kondensatory o regulowanej pojemności	G	0,28	0,1625	0,09
Kondensatory ceramiczne o regulowanej pojemności	G	0,35	0,155	0,008
Przerywacze	G	0,80	0,5	0,31
Wyłączniki	G	0,40	0,1375	0,045
Wyłączniki cieplne	G	0,50	0,3	0,028
Mufy	G	1,1	0,06	0,04
Diody ograniczające przepięcia	G	0,437	0,2	0,08
Diody (w układach impulsowych, logicznych i przekaźnikowych)	G	0,3	0,15	0,08
Odłączniki	G	2,1 /k*	0,4/k	0,09/k
Gniazda bezpieczników topikowych	G	0,10	0,02	0,008
Bezpieczniki topikowe	G	0,82	0,5	0,30
Złącza elektryczne	G	0,47/k	0,2/k	0,3/k
Złącza montażowe	G	0,385/k	0,2125/k	0,04/k
Złącza współosiowe	G	0,3650	0,2125/k	0,06/k
Złącza międzyobwodowe	G	0,94/k	0,4/k	0,06/k
Złącza, dla kontroli	G	0,082	0,05	0,02
Złącza	G	4,7/k	2/k	0,03/k
Styczniki	G	0,4/k	0,25/k	0,1/k
Liczniki	G	5,25	4,2	3,5

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Kryształy	G	0,14	0,10	0,04
Kryształy dla częstotliwości radiowych	G	0,6	0,3	0,625
Kryształy selenowe	G	0,42	0,3	0,12
Kryształy diod krzemowych	G	0,28	0,20	0,08
Trzymaki kryształów	G	0,10	0,02	0,01
Linie opóźniające	G	0,25	0,1	0,28
Linie opóźniające z regulacją	G	4,62	3,00	0,22
Diody próżniowe	G	1,42	0,2	0,16
Diody germanowe	G	0,38	0,2	0,23
Diody selenowe	G	0,6	0,2	0,11
Diody krzemowe	G	0,25	0,2	0,15
Diody węglikowokrzemowe	G	0,55	0,02	0,009
Sprzęgła magnetyczne	G	0,93	0,6	0,45
Sprzęgła poślizgowe	G	0,94	0,3	0,07
Uzwojenia (ogólnie)	G	0,088	0,05	0,038
Uzwojenia dławików	G	0,100	0,02	0,01
Uzwojenia filtrów	G	0,25	0,03	0,012
Uzwojenia dławików anodowych	G	0,031	0,02	0,009
Uzwojenia silników	G	0,045	0,03	0,01
Uzwojenia dla częstotliwości radiowych	G	0,05	0,01	0,005
Uzwojenia przekaźników, wtórników itp.	G	0,20	0,1	0,03
Cewki strojeniowe	G	0,2858	0,15	0,0142
Grzejniki	G	6,21	4,0	1,112
Grzejniki ~	G	7,67	0,7	0,081
Element grzejny elektryczny	M	0,04	0,02	0,01
Element grzejny elektryczny	G	—	7,67	—
Element grzejny elektryczny (przeciążony)	M	18,6	15,0	2,21
Głowice (zapisujące i kasujące)	G, M	0,26	0,18	0,13
Indykatory	M	0,031	0,02	0,011

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Indykatory (solenoidy)	G	0,091	0,04	0,02
Ignitrony	G	0,81	0,02	0,01
Izolacja	G	0,72	0,50	0,011
Izolatory	G	0,08	0,05	0,03
Izolatory odbijające	G	0,30	0,075	0,051
Inwertory	G	100,0	40,0	10,70
Punkty lutownicze	G	1,05	0,004	0,0001
Punkty lutownicze przy prądzie pulsującym	G	0,08	0,04.	0,02
Lampy	G	8,0	0,625	0,1
Lampy	M	35,0	8,625	3,45
Lampy żarowe	G, M	32,0	8,0	5,20
Lampy neonowe	M	18,0	10,25	4,50
Lampy neonowe	G	1,52	0,1	0,019
Soczewki	G	27,7	6,925	1,21
Liczniki elektryczne	G, M	5,77	1,375	1,35
Silniki	M	7,5	0,625	0,15
Silniki	G	0,58	0,3	0,11
Silniki wentylatorów	M	5,5	0,2	0,05
Silniki elektryczne	M	0,58	0,3	0,11
Silniki elektryczne prądu zmiennego	G	9,36	5,24	1,12
Silniki elektryczne prądu stałego	G	—	9,36	—
Serwomotory	M	0,35	0,23	0,11
Serwomotory	G	5,61	1,51	0,101
Silniki krokowe	G	0,71	0,37	0,228
Mnożniki (sygnałów)	G	6,01	1,2	0,82
Obwody dla częstotliwości pośrednich	G	1,06	0,4	0,26
Obwody opóźniające	G	0,96	0,6	0,24
Obwody dla częstotliwości radiowych	G	2,43	1,4	0,37
Obwody formowania impulsów	M	4,92	3,075	1,23

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Potencjometry	G	12,5	3,0	0,70
Potencjometry	M	15,9	3,0	0,01
Potencjometry węglowe	G	10,75	0,25	0,10
Potencjometry węglowe	M	4,44	0,25	0,1
Potencjometry (kompozycyjne) warstwowe	G	0,30	0,10	0,018
Potencjometry	G	14,70	5,0	1,18
Potencjometry	G	11,0	5,0	0,537
Potencjometry sterowane silnikiem	G	12,60	4,485	1,71
Potencjometry stopowe	G	15,7	7,0	4,4
Potencjometry drutowe	G	2,05	1,4	0,137
Potencjometry miniaturowe	M	2,04	1,2	0,53
Potencjometry miniaturowe drutowe (10 kΩ)	M	1,92	1,19	0,53
Pompy o napędzie elektrycznym	G	31,3	13,5	3,33
Pompy o napędzie elektrycznym	G	27,4	8,7	2,25
Opływowe obudowy anten	G	5,22	3,0	0,78
Dławiki ładujące	G	2,220	1,3875	0,555
Dławiki dla małych częstotliwości	G	0,280	0,175	0,070
Dławiki nasycone	G	0,32	0,14	0,12
Prostowniki	G	1,6	0,6	0,26
Prostowniki	M	0,75	0,6	0,28
Prostowniki selenowe	G	1,6	0,76	0,26
Prostowniki selenowe	M	1,60	1,1625	0,32
Zwory przekaźników	G	0,5 /k	0,3/k	0,11/k
Przekaźniki ogólnego przeznaczenia	G	0,48/k	0,25/k	0,1 l/k
Przekaźniki silnoprądowe	G	0,81/k	0,5/k	0,30/k
Przekaźniki hermetyczne	G	0,19/k	0,04/k	0,02/k
Przekaźniki pośrednie	G	0,54/k	0,25/k	0,145/k
Przekaźniki szybkodziałające (milisekundowe)	G	0,84//c	0,44/k	0,19/k
Przekaźniki miniaturowe	G	0,25/k	0,06/k	0,03 /k

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Przekaźniki miniaturowe szybkodziałające	G	l;l3/k	0,7/k	0,42/k
Przekaźniki mocy	G	4,10/k	0,3/k	0,15/k
Przekaźniki wysokoczułe	G	0,89/k	0,4/k	0,22/k
Przekaźniki z opóźnieniem czasowym	G	0,748/k	0,39/k	0,156/k
Przekaźniki cieplne	G	1,0/k	0,4/k	0,12/k
Przekaźniki czasowe, elektroniczne	M	1,80	1,2	0,24
Przekaźniki czasowe, elektromechaniczne	M	2,57	1,5	0,79
Przekaźniki czasowe, pneumatyczne	M	6,80	3,5	1,15
Rezystory węglowe	G	0,888	0,045	0,005
Rezystory węglowe	G	0,57	0,25	0,11
Rezystory warstwowe (kompozycyjne)	G	0,297	0,043	0,005
Rezystory warstwowe (kompozycyjne)	M	0,15	0,043	0,017
Rezystory napylane	G	0,058	0,03	0,011
Rezystory nienastawne	G	0,888	0,03	0,005
Rezystory nienastawne	M	0,07	0,03	0,01
Rezystory dużej mocy	G	0,065	0,028	0,009
Rezystory precyzyjne	G	_	0,004	—
Rezystory precyzyjne	M	0,292	0,125	0,041
Rezystory tyrytowe	G	0,153	0,10	0,047
Rezystory drutowe	G	0,126	0,068	0,038
Rezystory drutowe	M	0,165	0,087	0,046
Rezystory drutowe dokładne	M	0,191	0,091	0,052
Rezystory drutowe dokładne	G	0,126	0,068	0,088
Rezystory drutowe mocy	G	0,076	0,04	0,021
Rezystory drutowe precyzyjne	G	0,114	0,06	0,032
Ograniczniki	M	0,983	0,59	0,197
Oporniki nastawne	M	0,19	0,13	0,07
Ekrany dla częstotliwości radiowych	G	0,15	0,09	0,03
Ekrany lampowe	G	0,04	0,025	0,005

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Złącza lampowe nóżkowe	G	0,009/k	0,005/k	0,0021 /k
Solenoidy	M	0,55	0,06	0,036
Rozruszniki, startery	M	16,1	10,0	3,03
Aparatura przełączająca	G	1,14/c	0,05 /c	0,009/c
Przełączniki krzywkowe	G	0,12/c	0,075/c	0,048/c
Wyłączniki blokady	G	1,0 /c	0,5 /c	0,25/c
Wyłączniki miniaturowe	G	0,50/c	0,25/c	0,09 /c
Wyłączniki przyciskowe	G	0,1 l/c	0,063 /c	0,043/c
Wyłączniki pakietowe pokrętne	M	0,660/c	0,175/c	0,118/c
Wyłączniki wysokoczułe (duże)	G	0,072/c	0,045/c	0,021/c
Wyłączniki wysokoczułe (małe)	G	0,124/c	0,06/c	0,045/c
Wyłączniki z napędem silnikowym	G	0,292/c	0,190/c	0,128/c
Wyłączniki wodzikowe	G	0,112/c	0,054/c	0,041/c
Wyłączniki krańcowe	G	0,261/c	0,161 /c	0,114/c
Przełączniki dźwigniowe	G	0,123/c	0,06/c	0,015/c
Wyłączniki falowodów	G	0,83 /c	0,50/c	0,38/c
Czujniki	M, G	52,2	15,0	7,0
Transformatory	M	0,62	0,2	0,07
Transformatory	G	0,04	0,2	0,01
Transformatory na częstotliwości akustyczne	G	0,04	0,02	0,01
Transformatory na średnie częstotliwości	M, G	0,31	0,1	0,035
Transformatory separujące	M, G	0,093	0,03	0,011
Transformatory wejściowe	G	2,08	1,09	0,12
Transformatory wyjściowe	M	2,08	1,04	0,46
Transformatory wyjściowe	G	0,2	0,09	0,04
Transformatory żarzeniowe	M	2,08	1,04	0,46
Transformatory mocy	G	0,60	0,3	0,13
Transformatory zasilania	M	1,88	0,94	0,407
Transformatory zasilania	G	1,69	0,5	0,03

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Transformatory impulsowe	M	0,235	0,15	0,065
Transformatory precyzyjne	M	0,814	0,2625	0,092
Transformatory regulowane	G	0,31	0,1	0,035
Tranzystory	M	1,02	0,61	0,38
Tranzystory	G	1,44	0,61	0,025
Tranzystory stosowane w zasilaczach	G	0,84	0,5	0,31
Tranzystory germanowe	G	1,91	0,3	0,05
Tranzystory kluczujące	M,G	0,71	0,4	0,10
Tranzystory krzemowe (ogólnie)	G	1,44	0,5	0,1
Tranzystory krzemowe małej mocy	G	1,44	0,84	0,45
Lampy elektronowe (ogólnie)	G	19,32	7,76	1,77
Tyratrony	G	5,26	2,65-	0,17
Klistrony	G	8,0	3,5	0,56
Magnetrony	G	350÷ 5500,0	150÷ 3000,0	75,0÷ 450,0
Falowody (ogólnie)	G	4,54	1,5	0,59
Falowody sztywne	G	1,92	1,1	0,59
Falowody giętkie	G	4,54	2,64	1,33
Wzmacniacze magnetyczne (ogólnie)	G	0,855	0,085	0,002
Wzmacniacze magnetyczne średnie	G	0,485	0,152	0,052
Wzmacniacze magnetyczne mocy	G	7,11	5,65	2,02
Wzmacniacze magnetyczne sterujące	G	15,33	5,35	2,36
Przyrządy pomiarowe	G	5,77	0,025	0,005
Przyrządy pomiarowe elektryczne	G	5,77	0,036	0,005
Przyrządy pomiarowe elektryczne prądu stałego	G	0,040	0,036	0,017
Generatory (ogólnie)	G	21,41	0,9	0,3
Generatory prądu stałego	M	6,28	0,9	0,3
Generatory prądu stałego	G	21,0	12,4	2,84
Generatory prądu zmiennego	G	18,82	15,0	11,0

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Generatory częstotliwości akustycznej	G	5,15	0,35	0,14
Generatory częstotliwości akustycznej	M	0,56	0,35	0,14
Diafragmy	G	0,9	0,6	0,1
Diafragmy	M	9,0	6,0	0,1
Źródła mocy hydraulicznej	G	19,3	6,1	0,28
Zawory zasuwowe	G	44,8	5,1	0,112
Zawory zasuwowe, wzbudzenia	G	2,29	0,212	0,112
Zawory kulkowe	G	7,7	4,6	1,11
Zawory dźwigniowe	G	7,4	4,6	1,08
Zawory obciążone	G	18,94	5,7	0,112
Zawory szybkodziałające	G	5,33	3,4	1,33
Zawory obejściowe	G	8,13	2,24	0,16
Zawory odcinające	G	4,7	2,3	0,112
Zawory odcinające	M	10,2	6,5	1,98
Zawory kontrolne	G	2,2	1,9	0,24
Zawory odpływowe	G	—	0,224	—
Zawory napełniające	G	1,12	0,112	0,1
Zawory pływakowe	G	11,2	8,0	5,6
Zawory paliwowe	G	37,2	6,4	1,24
Zawory ciśnieniowe	G	32,5	5,6	0,112
Zawory pierwotne	G	14,8	6,3	0,165
Zawory silnikowe	G	—	37,2	—
Zawory regulatorów	G	—	0,56	—
Zawory odciążające	G	14,1	5,7	0,224
Zawory odciążające ciśnieniowe	G	32,5	3,92	0,224
Zawory odciążające termiczne	G	12,3	8,4	5,6
Zawory zbiornikowe	G	10,8	6,88	2,70
Zawory selektorowe	G	19,7	16,0	3,70
Zawory selektorowe regulacyjne, ręczne	G	2,14	1,10	0,67

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Zawory przełączające	G	10,2	6,5	0,112
Zawory przełączające, ręczne	G	—	0,112	—
Zawory przełączające o napędzie silnikowym (elektrycznym)	G	—	3,36	—
Zawory przełączające o napędzie pneumatycznym	G	—	0,56	—
Zawory ślizgowe	G	2,88	1,12	0,56
Zawory suwakowe	G	—	1,12	—
Zawory elektromagnetyczne	G	19,7	11,0	2,27
Zawory elektromagnetyczne trzydrożne	G	7,41	4,6	1,87
Zawory elektromagnetyczne, czterodrożne	G	7,22	4,6	1,81
Zawory kształtowe	G	9,76	6,9	2,89
Zawory przepustowe	G	2,24	0,5	0,26
Serwozawory	G	56,0	30,0	16,8
Manometry	G	15,0	1,3	0,135
Silniki hydrauliczne	G	2,25	4,3	1,45
Sprężarki	G	3,57	2,4	0,342
Pompy	G	4,90	13,5	1,12
Pompy z napędem maszynowym	G	31,3	8,74	1,12
Pompy paliwowe z napędem maszynowym	M	3,52	2,25	1,12
Tłoki hydrauliczne	G	0,35	0,2	0,08
Napędy pneumatyczne o stałej prędkości	G	6,2	2,8	0,3
Uszczelki korkowe	G	0,077	0,04	0,003
Uszczelki nasycane (impregnowane)	G	0,225	0,137	0,05
Uszczelki ze stopu „Monel"	G	0,908	0,05	0,0022
Uszczelki pierścieniowe	G	0,035	0,02	0,01
Uszczelki z mas plastycznych	G	0,07	0,05	0,01
Uszczelki gumowe	G	.0,03	0,02	0,011
Regulatory ciśnienia	G	15,98	4,25	0,89
Regulatory hydrauliczne	G	—	3,55	—
Regulatory pneumatyczne	G	15,98	7,5	3,55

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Zbiorniki	G	3,37	1,5	0,48
Zbiorniki hydrauliczne	G	-—	3,37	—
Złącza giętkie	G	6,1	2,237	0,09
Łączniki hydrauliczne	G	2,01	0,03	0,012
Łączniki pneumatyczne	G	1,15	0,04	0,021
Złącza hydrauliczne	G	—	0,56	—
Przewody rurowe (rurociąg)	G	4,85	1,1	0,25
Cylindry	G	0,81	0,007	0,005
Cylindry	M	0,12	0,008	0,005
Cylindry pneumatyczne	M	0,031	0,004	0,002
Przewody giętkie (węże) niskociśnieniowe	G	5,22	2,0	0,05
Przewody giętkie (węże) na wysokie ciśnienia	G	5,22	3,93	0,157
Przewody (węże) elastyczne	G	—	0,067	—
Przewody (węże) pneumatyczne	G	—	3,66	—
Tuleje	G	0,008	0,045	0,02
Przekładnie różnicowe	G	1,58	1,00	0,012
Uchwyty, zaciski	G	0,0009	0,0005	0,0003
Pierścienie o zmiennym przekroju	G	3,31	0,55	0,045
Skrzynie wału korbowego	G	1,8	0,9	0,1
Skrzynie przekładniowe	G	4,3	0,63	0,051
Skrzynie przekładni łączących	G	0,36	0,2	0,11
Skrzynie przekładni sektorowych	G	1,8	0,912	0,051
Skrzynie biegów	G	4,3	2,175	0,087
Korpusy	G	2,05	1,1	0,03
Korpusy wzmocnione	G	0,91	0,4	0,016
Korpusy specjalne	G	0,04	0,0125	0,0005
Sprzęgła rozłączne	G	1,1	0,06	0,04
Sprzęgła poślizgowe	G	0,94	0,03	0,07
Ograniczniki	G	0,783	0,35	0,165

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Przeciwwagi duże	G	0,545	0,3375	0,13
Przeciwwagi małe	G	0,03	0,0125	0,005
Sprężyny	G	0,221	0,005	0,004
Sprężyny silnie obciążone	G	0,42	0,22	0,009
Sprężyny słabo obciążone	G	0,022	0,012	0,001
Urządzenia napędowe	G	5,62	0,4	0,33
Urządzenia napędowe z kołem pasowym	G	—	0,16	—
Napędy pomocniczych serwomechanizmów	G	36,6	12,5	0,86
Napędy serwomechanizmów	G	36,6	12,5	0,86
Napędy bardziej ekonomiczne	G	18,5	3,3	0,6
Napędy mniej ekonomiczne	G	9,6	1,8	0,17
Napędy pasowe	G	—	3,6	—
Łożyska	G	5,5	0,5	0,02
Łożyska kulkowe (średnie)	G	2,22	0,65	0,02
Łożyska sprzęgieł łączących	G	0,42	0,21	0,008
Łożyska rolkowe	G	1,0	0,5	0,02
Łożyska kulkowe (duże)	G	3,53	1,80	0,072
Łożyska kulkowe (małe)	G	1,72	0,875	0,35
Resory	G	—	0,112	—
Rolki (wałki)	G	0,1	0,075	0,02
Połączenia mechaniczne	G	1,96	0,02	0,4
Połączenia obrotowe	G	9,55	7,50	6,89
Połączenia lutowane	G	1,05	0,004	0,0001
Komory łączące	G	0,58	0,4	0,28
Serwomechanizmy	G	3,4	2,0	1,1
Sworznie	G	0,62	0,35	0,15
Ograniczające pierścienie	G	—	0,36	—
Urządzenia sprzęgające kierunkowe	G	3,21	1,52	0,065
Urządzenia sprzęgające obrotowe	G	0,049	0,025	0,001

Tab. 3.1. cd. Intensywność uszkodzeń elementów maszyn (wartość średnia wg badań doświadczalnych, wartości graniczne górne i dolne wyznaczone obliczeniowo) [19]

Nazwa elementów		Intensywność uszkodzeń λ $[10^{-6}\ h^{-1}]$		
Firma „Martin" USA – M Firma „General Electric" USA – G		granica górna	wartość średnia	granica dolna
Urządzenia sprzęgające giętkie	G	1,348	0,039	0,027
Urządzenia sprzęgające sztywne	G	0,049	0,025	0,001
Filtry mechaniczne	G	1,8	0,3	0,011
Koła zębate	G	0,98	0,12	0,002
Drążki prowadzące wodzików	G	—	3,68	—
Trzpienie (kołki)	G	1,51	0,346	0,017
Trzpienie z nacięciem	G	0,1	0,025	0,006
Trzpienie prowadnikowe	G	2,6	1,625	0,65
Przeguby (zawiasy)	G	—	99	—
Przeguby uniwersalne	G	12,0	2,5	1,12
Podstawy, chassis	G	—	0,921	—
Mimośrody (ekscentryki)	G	0,004	0,002	0,001

k – na jeden kontakt
c – na jeden cykl

Uwaga. Podane w tablicy dane są orientacyjne.

Tab. 3.2. Podstawowe funkcje rozkładu prawdopodobieństwa uszkodzeń, wskaźniki niezawodności [17]

Lp.	Nazwa rozkładu Parametry rozkładu	Funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa *f(t)*	Dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa *F(t)*	Funkcja niezawodności *R(t)*	Funkcja intensywności uszkodzeń *λ(t)*	Wartość oczekiwana *E(T)*	Uwagi
1	Wykładniczy θ	$\frac{1}{\theta}e^{-\frac{t}{\theta}}$	$1-e^{-\frac{t}{\theta}}$	$e^{-\frac{t}{\theta}}$	$\frac{1}{\theta}$	θ	$t \geq 0$
2	Weibulla *a, b*	$\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}}$	$1-e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}}$	$e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}}$	$\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$	$a\Gamma\left(\frac{1}{b}+1\right)$	$\Gamma(p)=\int_0^{\infty} x^{p-1}e^{-x}dx$ $\Gamma(p)$ - funkcja gamma Eulera
3	Normalny *m, σ*	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}=\frac{1}{\sigma}\varphi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}dx=\phi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)$	$1-\phi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)$	$\frac{\frac{1}{\sigma}\varphi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)}{1-\phi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)}$	m	$\phi(u)=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{0} e^{-u^2}du$– całka Laplace'a *φ(u)* – gęstość rozkładu normalnego wg tablicy 3.2 a *ϕ(u)* – dystrybuanta rozkładu normalnego wg tablicy 3.2 b
4	Logarytmiczno--normalny *m, σ*	$\frac{M}{t\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(lgt-m)^2}{2\sigma^2}}=\frac{M}{\sigma t}\varphi\left(\frac{lgt-m}{\sigma}\right)$	$\frac{M}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{0}^{t}\frac{1}{x}e^{-\frac{(lgx-m)^2}{2\sigma^2}}dx=\phi\left(\frac{lgt-m}{\sigma}\right)$	$1-\phi\left(\frac{lgt-m}{\sigma}\right)$	$\frac{\frac{M}{\sigma t}\varphi\left(\frac{lgt-m}{\sigma}\right)}{1-\phi\left(\frac{lgt-m}{\sigma}\right)}$	$e^{\left(\frac{m}{M}+\frac{\sigma^2}{2M^2}\right)}$	*t>0* jeżeli *Y=lg T*, to *M=lge=0,4343*; jeżeli *Y=ln T*, to *M=1*

Tab. 3.2 cd. Gęstość rozkładu normalnego $u = \frac{t-\mu}{\sigma}$; $\varphi(u) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right) e^{-u^2/2}$ [17]

u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	u
0	0,500000	0,503989	0,507978	0,511966	0,515953	0,519939	0,523922	0,527903	0,531881	0,535856	0
0,1	0,539828	0,543795	0,547758	0,551717	0,555670	0,559618	0,563559	0,567495	0,571424	0,575345	0,1
0,2	0,579260	0,583166	0,587064	0,590954	0,594835	0,598706	0,602568	0,606420	0,610261	0,614092	0,2
0,3	0,617911	0,621720	0,625516	0,629300	0,633072	0,636831	0,640576	0,644309	0,648027	0,651732	0,3
0,4	0,655422	0,659097	0,662757	0,666402	0,670031	0,673645	0,677242	0,680822	0,684386	0,687933	0,4
0,5	0,691462	0,694974	0,698468	0,701944	0,705401	0,708840	0,712260	0,715661	0,719043	0,722405	0,5
0,6	0,725747	0,729069	0,732371	0,735653	0,738914	0,742154	0,745373	0,748571	0,751748	0,754903	0,6
0,7	0,758036	0,761148	0,764238	0,767305	0,770350	0,773373	0,776373	0,779350	0,782305	0,785236	0,7
0,8	0,788145	0,791030	0,793892	0,796731	0,799546	0,802337	0,805105	0,807850	0,810570	0,813267	0,8
0,9	0,815940	0,818589	0,821214	0,823814	0,826391	0,828944	0,831472	0,833977	0,836457	0,838913	0,9
1,0	0,841345	0,843752	0,846136	0,848495	0,850830	0,853141	0,855428	0,857690	0,859929	0,862143	1,0
1,1	0,864334	0,866500	0,868643	0,870762	0,872857	0,874928	0,876976	0,879000	0,881000	0,882977	1,1
1,2	0,884930	0,886861	0,888768	0,890651	0,892512	0,894350	0,896165	0,897958	0,899727	0,901475	1,2
1,3	0,903200	0,904902	0,906582	0,908241	0,909877	0,911492	0,913085	0,914657	0,916207	0,917736	1,3
1,4	0,919243	0,920730	0,922196	0,923641	0,925066	0,926471	0,927855	0,929219	0,930563	0,931888	1,4
1,5	0,933193	0,934478	0,935745	0,936992	0,938220	0,939429	0,940620	0,941792	0,942947	0,944083	1,5
1,6	0,945201	0,946301	0,947384	0,948449	0,949497	0,950529	0,951543	0,952540	0,953521	0,954486	1,6
1,7	0,955435	0,956367	0,957284	0,958185	0,959070	0,959941	0,960796	0,961636	0,962462	0,963273	1,7
1,8	0,964070	0,964852	0,965620	0,966375	0,967116	0,967843	0,968557	0,969258	0,969946	0,970621	1,8
1,9	0,971283	0,971933	0,972571	0,973197	0,973810	0,974412	0,975002	0,975581	0,976148	0,976705	1,9
2,0	0,977250	0,977784	0,978308	0,978822	0,979325	0,979818	0,980301	0,980774	0,981237	0,981691	2,0
2,1	0,982136	0,982571	0,982997	0,983414	0,983823	0,984222	0,984614	0,984997	0,985371	0,985738	2,1
2,2	0,986097	0,986447	0,986791	0,987126	0,987455	0,987776	0,988089	0,988396	0,988696	0,988989	2,2
2,3	0,989276	0,989556	0,989830	0,990097	0,990358	0,990613	0,990863	0,991106	0,991344	0,991576	2,3
2,4	0,991802	0,992024	0,992240	0,992451	0,992656	0,992857	0,993053	0,993244	0,993431	0,993613	2,4

Tab. 3.2 cd. Gęstość rozkładu normalnego $u = \frac{t-\mu}{\sigma}$; $\varphi(u) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right) e^{-u^2/2}$ [17]

u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	u
2,5	0,993790	0,993963	0,994132	0,994297	0,994457	0,994614	0,994766	0,994915	0,995060	0,995201	2,5
2,6	0,995339	0,995473	0,995604	0,995731	0,995855	0,995975	0,996093	0,996207	0,996319	0,996427	2,6
2,7	0,996533	0,996636	0,996736	0,996833	0,996928	0,997020	0,997110	0,997197	0,997282	0,997365	2,7
2,8	0,997445	0,997523	0,997599	0,997673	0,997744	0,997814	0,997882	0,997948	0,998012	0,998074	2,8
2,9	0,998134	0,998193	0,998250	0,998305	0,998359	0,998411	0,998462	0,998511	0,998559	0,998605	2,9
3,0	0,998650	0,998694	0,998736	0,998777	0,998817	0,998856	0,998893	0,998930	0,998965	0,998999	3,0
3,1	0,999032	0,999065	0,999096	0,999126	0,999155	0,999184	0,999211	0,999238	0,999264	0,999289	3,1
3,2	0,999313	0,999336	0,999359	0,999381	0,999402	0,999423	0,999443	0,999462	0,999481	0,999499	3,2
3,3	0,999517	0,999534	0,999550	0,999566	0,999581	0,999596	0,99961	0,999624	0,999638	0,999651	3,3
3,4	0,999663	0,999675	0,999687	0,999698	0,999709	0,999720	0,99973	0,999740	0,999749	0,999758	3,4

Tab. 3.2 cd. Dystrybuanta rozkładu normalnego $u = \frac{t-\mu}{\sigma}; \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-u^2/2} du$ [17]

u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	u
0	0,500000	0,503989	0,507978	0,511967	0,515953	0,519939	0,523922	0,527903	0,531881	0,535856	0
0,1	0,539828	0,543795	0,547758	0,551717	0,555670	0,559618	0,563559	0,567495	0,571424	0,575345	0,1
0,2	0,579260	0,583166	0,587064	0,590954	0,594835	0,598706	0,602568	0,606420	0,610261	0,614092	0,2
0,3	0,617911	0,621719	0,625516	0,629300	0,633072	0,636831	0,640576	0,644309	0,648027	0,651732	0,3
0,4	0,655422	0,659097	0,662757	0,666402	0,670031	0,673645	0,677242	0,680822	0,684386	0,687933	0,4
0,5	0,691462	0,694974	0,698468	0,701944	0,705402	0,708840	0,712260	0,715661	0,719043	0,722405	0,5
0,6	0,725747	0,729069	0,732371	0,735653	0,738914	0,742154	0,745373	0,748571	0,751748	0,754903	0,6
0,7	0,758036	0,761148	0,764238	0,767305	0,770350	0,773373	0,776373	0,779350	0,782305	0,785236	0,7
0,8	0,788145	0,791030	0,793892	0,796731	0,799546	0,802338	0,805106	0,807850	0,810570	0,813267	0,8
0,9	0,815940	0,818589	0,821214	0,823814	0,826391	0,828944	0,831472	0,833977	0,836457	0,838913	0,9
1	0,841345	0,843752	0,846136	0,848495	0,850830	0,853141	0,855428	0,857690	0,859929	0,862143	1
1,1	0,864334	0,866500	0,868643	0,870762	0,872857	0,874928	0,876976	0,878999	0,881000	0,882977	1,1
1,2	0,884930	0,886860	0,888767	0,890651	0,892512	0,894350	0,896165	0,897958	0,899727	0,901475	1,2
1,3	0,903199	0,904902	0,906582	0,908241	0,909877	0,911492	0,913085	0,914656	0,916207	0,917736	1,3
1,4	0,919243	0,920730	0,922196	0,923641	0,925066	0,926471	0,927855	0,929219	0,930563	0,931888	1,4
1,5	0,933193	0,934478	0,935744	0,936992	0,938220	0,939429	0,940620	0,941792	0,942947	0,944083	1,5
1,6	0,945201	0,946301	0,947384	0,948449	0,949497	0,950529	0,951543	0,952540	0,953521	0,954486	1,6
1,7	0,955435	0,956367	0,957284	0,958185	0,959071	0,959941	0,960796	0,961636	0,962462	0,963273	1,7
1,8	0,964070	0,964852	0,965621	0,966375	0,967116	0,967843	0,968557	0,969258	0,969946	0,970621	1,8
1,9	0,971284	0,971933	0,972571	0,973197	0,973810	0,974412	0,975002	0,975581	0,976148	0,976705	1,9
2	0,977250	0,977784	0,978308	0,978822	0,979325	0,979818	0,980301	0,980774	0,981237	0,981691	2
2,1	0,982136	0,982571	0,982997	0,983414	0,983823	0,984222	0,984614	0,984997	0,985371	0,985738	2,1
2,2	0,986097	0,986447	0,986791	0,987126	0,987455	0,987776	0,988089	0,988396	0,988696	0,988989	2,2
2,3	0,989276	0,989556	0,989830	0,990097	0,990358	0,990613	0,990863	0,991106	0,991344	0,991576	2,3

Tab. 3.2 cd. Dystrybuanta rozkładu normalnego $u = \frac{t-\mu}{\sigma}; \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-u^2/2} du$ [17]

u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	u
2,4	0,991802	0,992024	0,992240	0,992451	0,992656	0,992857	0,993053	0,993244	0,993431	0,993613	2,4
2,5	0,993790	0,993963	0,994132	0,994297	0,994457	0,994614	0,994766	0,994915	0,995060	0,995201	2,5
2,6	0,995339	0,995473	0,995603	0,995731	0,995855	0,995975	0,996093	0,996207	0,996319	0,996427	2,6
2,7	0,996533	0,996636	0,996736	0,996833	0,996928	0,997020	0,997110	0,997197	0,997282	0,997365	2,7
2,8	0,997445	0,997523	0,997599	0,997673	0,997744	0,997814	0,997882	0,997948	0,998012	0,998074	2,8
2,9	0,998134	0,998193	0,998250	0,998305	0,998359	0,998411	0,998462	0,998511	0,998559	0,998605	2,9
3	0,998650	0,998694	0,998736	0,998777	0,998817	0,998856	0,998893	0,998930	0,998965	0,998999	3
3,1	0,999032	0,999064	0,999096	0,999126	0,999155	0,999184	0,999211	0,999238	0,999264	0,999289	3,1
3,2	0,999313	0,999336	0,999359	0,999381	0,999402	0,999423	0,999443	0,999462	0,999481	0,999499	3,2
3,3	0,999517	0,999533	0,999550	0,999566	0,999581	0,999596	0,999610	0,999624	0,999638	0,999650	3,3
3,4	0,999663	0,999675	0,999687	0,999698	0,999709	0,999720	0,999730	0,999740	0,999749	0,999758	3,4

Rozkład wykładniczy (tab. 3.2) jest szeroko stosowany w analizie niezawodności i teorii masowej obsługi [16–19].

Gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej o takim rozkładzie określana jest wzorem:

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{t}{\theta}} \; dla \; t>0 \tag{3.22}$$

natomiast dystrybuanta zmiennej losowej o rozkładzie wykładniczym

$$F(t) = \frac{1}{\theta} \int_0^t e^{-\frac{x}{\theta}} dx = 1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \; dla \; t>0 \tag{3.23}$$

Własności rozkładu:

- wartość oczekiwana: $E(T) = \theta$,
- odchylenie standardowe: $\sigma = \theta$.

Rozkład Weibulla (tab. 3.2) jest szeroko stosowany przy ocenie niezawodności i czasu pracy elementów mechanicznych i elektromechanicznych oraz elementów aparatury elektronicznej [15].

Gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej o takim rozkładzie:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \; dla \; t>0 \tag{3.24}$$

natomiast dystrybuanta określona jest wzorem:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \; dla \; t>0 \tag{3.25}$$

Własności rozkładu:

- wartość oczekiwana: $E(T) = a\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)$,
- odchylenie średnie: $\sigma = a^{\frac{1}{b}} \left[\Gamma\left(\frac{2}{b} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{b} + 1\right)\right]^{\frac{1}{2}}$.

Należy zaznaczyć, że rozkład Weibulla powstał jako rozkład empiryczny, natomiast podstawy teoretyczne tego rozkładu zostały opracowane później przez B.W. Gniedenkę. Dlatego też należałoby nazwać ten rozkład rozkładem Weibulla – Gniedenki [19].

Rozkład normalny (rozkład Gaussa) (tab. 3.2) spotykany jest w takich przypadkach, gdy różnice wartości zmiennej losowej są wynikiem dużej liczby jednorodnych ze względu na swój wpływ czynników, z których żaden nie jest dominujący. Ma to miejsce w błędach pomiarów, w rozrzucie podczas strzelania do celu, w rozrzucie wymiarów wyrobów wykonywanych na obrabiarkach automatycznych itp. [16–19].

Gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej o rozkładzie normalnym określona jest wzorem:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad dla\ -\infty < t < +\infty \tag{3.26}$$

natomiast dystrybuanta tej zmiennej losowej o rozkładzie normalnym opisana jest zależnością:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad dla\ -\infty < t < +\infty \tag{3.27}$$

Własności rozkładu:

- obszar możliwych wartości rozkładu zmiennej losowej: od $-\infty$ do $+\infty$,
- rozkład jest symetryczny względem wartości oczekiwanej,
- wartość oczekiwana $E(T)=\mu$,
- odchylenie średnie σ,
- współczynnik zmienności $\frac{\sigma}{\mu}$.

Rozkład logarytmiczno-normalny (tab. 3.2) – spotykany często w praktyce rozkład normalny zmiennej losowej o postaci $Y=a\ ln\ T$. Wtedy zmienna losowa T ma rozkład logarytmiczno-normalny. Dla takiego rozkładu gęstość prawdopodobieństwa [16–19]:

$$f(t) = \frac{M}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(lgt-\mu)^2}{2\sigma^2}}\ dla\ t>0 \tag{3.28}$$

a gęstość prawdopodobieństwa:

$$F(t) = \frac{M}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{x} e^{-\frac{(lgx-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \Phi\left(\frac{lgt-\mu}{\sigma}\right) \qquad (3.29)$$

Rozkład logarytmiczno-normalny jest dobrym modelem matematycznym dla danych doświadczalnych dotyczących trwałości zmęczeniowej materiałów, określania długotrwałej wytrzymałości detali, czasu poprawnej pracy wyrobów itp.

Przy małym współczynniku zmienności, tj. przy spełnieniu warunku $\frac{\sigma}{\mu} \ll 1$, rozkład logarytmiczno-normalny można aproksymować rozkładem normalnym. Własność tę wykorzystuje się często w obliczeniach technicznych, zmieniając rzeczywisty rozkład logarytmiczno-normalny odpowiednim rozkładem normalnym.

Wskaźniki niezawodności wyznaczane są na różnych etapach życia obiektu. Etapami tymi są:

- projekt wstępny,
- projekt techniczny,
- prototyp,
- partia próbna,
- produkcja seryjna,
- eksploatacja.

3.2. Ocena niezawodności układów w procesie eksploatacji

Wskaźniki niezawodności obiektu (układu) są niezbędną wiedzą o jego właściwościach eksploatacyjnych i ich zmianach. Stanowią bazę do planowania prac regulacyjnych i diagnostycznych. Właśnie dlatego praktyczna obsługa maszyn wymaga precyzyjnego (wg PN) wyrażenia charakterystyk niezawodnościowych obiektu. Do opisu charakterystyk niezawodnościowych obiektu technicznego stosuje się: PN-77/N-04010 – Niezawodność w technice – Wybór wskaźników niezawodności dla obiektów technicznych dwustanowych produkowanych masowo lub seryjnie; PN-77/N-04005 – Niezawodność w technice – Wskaźniki niezawodności – Nazwy, określenia symboli. Przedmiotem normy są nazwy, określenia i symbole wskaźników niezawodności obiektów technicznych dwustanowych (zdatny, niezdatny).

Jednym z podstawowych sposobów uzyskania informacji o niezawodności układu w procesie eksploatacji jest obróbka danych eksploatacyjnych o wszystkich zaistniałych uszkodzeniach. Dane te powinny zawierać [3, 4, 8, 13, 19]:

- rodzaj (typ) obiektu (urządzenie, układ, przyrząd, element),
- numer fabryczny, rok produkcji i datę rozpoczęcia eksploatacji,
- podstawowe parametry charakteryzujące poprawność działania obiektu (napięcie prądu, ciśnienie, temperatura, prędkość obrotowa, prędkość przemieszczeń itp.),
- otoczenie obiektu (zewnętrzne warunki pracy – temperatura, wilgotność, ciśnienie, drgania, skład chemiczny otaczającej atmosfery),
- charakter uszkodzenia (zwarcie, przerwa, rozerwanie, rozszczelnienie, zatarcie, zmiana istotnych parametrów poza dopuszczalne granice),
- przyczyny wystąpienia uszkodzenia (zużycie, starzenie, zmęczenie, uderzenie, korozja, erozja, wadliwy montaż),
- dane dotyczące usunięcia uszkodzenia (wymiana, naprawa, ponowna regulacja).

Wszystkie dane powinny być podane w sposób syntetyczny w tabelach, a ich prawdziwość powinna być potwierdzona podpisem przez obsługę techniczną eksploatowanego obiektu [4, 11, 15, 19].

Otrzymany materiał statystyczny dotyczący zebranych danych eksploatacyjnych o różnych uszkodzeniach oraz wyniki badań eksperymentalnych podlegają następnie analizie statystycznej, której celem jest:

- określenie modelu matematycznego rzeczywistego rozkładu uszkodzeń (wybiera się jeden z zalecanych przez PN 79/N-04031),
- wyznaczenie parametrów przyjętego rozkładu uszkodzeń,
- ustalenie poziomu zgodności rozkładu empirycznego wynikającego z danych statystycznych z przyjętym modelem matematycznym.

Punktem wyjściowym wyznaczania charakterystyk niezawodnościowych jest określenie typu maszyny odpowiednim znormalizowanym kodem (PN-77/N-04010), np. 1111.

W procesie ustalania kodu obiektu maszyny należy odpowiedzieć na poszczególne pytania wg następującego algorytmu oraz korzystając z tab. 3.3 i 3.4:

- Czy maszyna jest naprawialna? Jeśli tak, to pisze się pierwszą cyfrę kodu 2.
- Czy są ograniczenia dotyczące długości czasu eksploatacji maszyny, która ulegnie uszkodzeniom? (druga cyfra kodu). Pisze się 1, gdy eksploatacja trwa do pierwszego uszkodzenia, 2 – gdy praca trwa do osiągnięcia stanu granicznego, 3 – gdy praca trwa do czasu wykonania określonego zadania, 4 – gdy praca trwa do czasu wystąpienia *n*-tego uszkodzenia, 5 – gdy praca trwa do osiągnięcia stanu granicznego w warunkach oczekiwania na rozpoczęcie pracy.
- Jaki jest rodzaj pracy? (trzecia cyfra kodu). Pisze się 1, gdy praca jest ciągła, 2 – gdy praca jest z regularnymi przerwami, 3 – gdy praca jest z losowymi przerwami.
- Czy istnieją możliwości kontynuowania zadania po wystąpieniu uszkodzenia w zależności od czasu naprawy? (czwarta cyfra kodu). Pisze się 1, gdy niezależnie od długości czasu naprawy obiekt może kontynuować rozpoczęte zadanie, 2 – gdy niezależnie od długości czasu naprawy obiekt nie może kontynuować rozpoczętego zadania, 3 – gdy możliwość kontynuowania zadania uzależniona jest od czasu naprawy, 4 – gdy niezależnie od długości czasu naprawy obiekt nie może kontynuować zadania, jeżeli uszkodzenie występuje w warunkach pracy.

Zgodnie z ustalonym kodem np. 1222, 2222, należy wybrać bazowy wskaźnik niezawodności *R(t), F(t), f(t),* $\lambda(t)$, *E(T)* zgodnie z wytycznymi w tab. 3.4 [17].

Tab. 3.3. Ustalenie kodu uszkodzeń obiektu technicznego

Podstawa podziału na klasy	Miejsce cyfry w kodzie	Nazwa klasy	Cyfra kodu	Podstawa podziału na podklasy	Miejsce cyfry w kodzie	Cecha podklasy	Cyfra kodu
Podatność na naprawę	I	nienaprawialne	1	ograniczenia dotyczące długości czasu eksploatacji	II	do uszkodzenia	1
						do osiągnięcia stanu granicznego	2
						do wykonania określonych zadań	3
				rodzaj pracy	III	praca ciągła	1
						praca z regularnymi przerwami	2
						praca z losowymi przerwami	3
				możliwość kontynuowania zadania po uszkodzeniu	IV	zadanie może być kontynuowane po zastąpieniu uszkodzonego obiektu nowym	1
						zadanie nie może być kontynuowane po zastąpieniu uszkodzonego obiektu nowym	2
	I	naprawialne	2	ograniczenia dotyczące czasu eksploatacji	II	do wystąpienia pierwszego uszkodzenia	1
						do osiągnięcia stanu granicznego	2
						do wykonania określonych zadań	3
						do wystąpienia *n*-tego uszkodzenia	4
						do osiągnięcia stanu granicznego w warunkach oczekiwania na rozpoczęcie pracy	5
				rodzaj pracy	III	praca ciągła	1
						praca z regularnymi przerwami	2
						praca z losowymi przerwami	3
				możliwość kontynuowania zadania po wystąpieniu uszkodzenia w zależności od czasu naprawy	IV	niezależnie od długości czasu naprawy obiekt może kontynuować rozpoczęte zadania	1
						niezależnie od długości czasu naprawy obiekt nie może kontynuować rozpoczętego zadania	2
						możliwość kontynuowania zadania uzależniona jest od czasu naprawy	3
						niezależnie od długości czasu naprawy obiekt nie może kontynuować zadania, jeżeli uszkodzenie wystąpi w „warunkach pracy”	4

Tab. 3.4. Wybór podstawowych wskaźników niezawodności

Kod	Oznaczenie i nazwa wskaźnika
1	**2**
1111 1121 1131	Θ – średni czas poprawnej pracy do wystąpienia uszkodzenia, $\lambda(t)$ – intensywność uszkodzeń [1)]
2111 2121 2131	Θ – średni czas poprawnej pracy do wystąpienia uszkodzenia
1211 1221 1231 2211 2221 2231	Θ – średni czas poprawnej pracy do wystąpienia uszkodzenia, Θ_S – średni zasób pracy
1222 1232 2222 2232 2422 2432	$R(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu w przedziale $\langle 0, t \rangle$, $P(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia się obiektu w przedziale $\langle 0, t \rangle$, Θ_S – średni zasób pracy, Θ_K – średni czas pracy między uszkodzeniami [2)]
1312 2312	$R(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu w przedziale $\langle 0, t \rangle$, $P(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia się obiektu w przedziale $\langle 0, t \rangle$
2411 2421 2431	$\omega(t)$ – parametr strumienia uszkodzeń, Θ_S – średni zasób pracy
2413	K_* – współczynnik wykorzystania technicznego, Θ_S – średni zasób pracy, $\omega(t)$ – parametr strumienia uszkodzeń
2423 2433	$\omega(t)$ – parametr strumienia uszkodzeń, K_g – współczynnik gotowości, Θ_S – średni zasób pracy, Θ_n – średni czas naprawy
2414 2424 2434 2514 2524 2534	K_{go} – współczynnik gotowości operacyjnej, Θ_S – średni zasób pracy,
1) Stosować dla wykładniczego rozkładu czasu poprawnej pracy. 2) Stosować dla obiektów naprawialnych.	

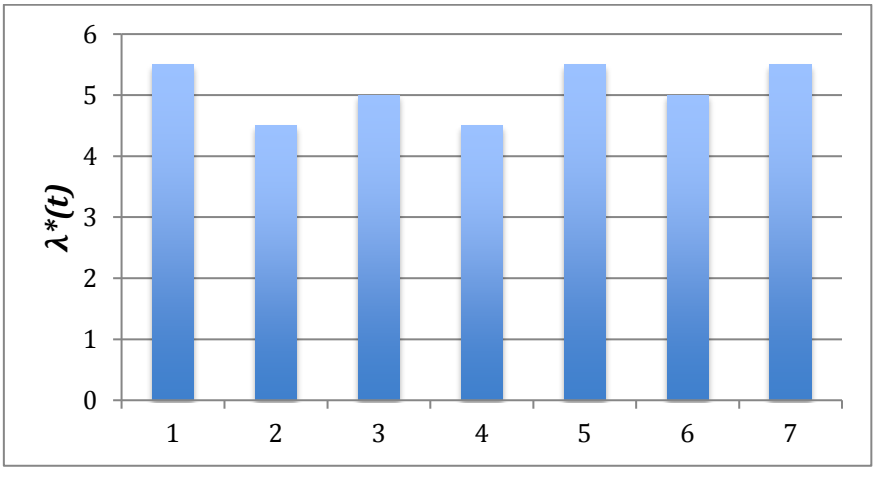
3.3. Ocena zgodności rozkładu z danymi doświadczalnymi

3.3.1. Wzrokowy test zgodności

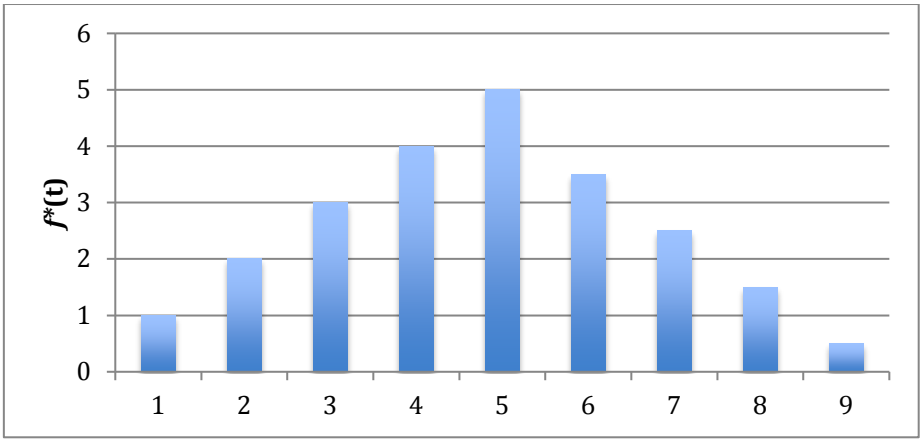
Rozpatrując zagadnienia estymacji, jak również hipotezy parametryczne, często zakłada się, że znamy postać rozkładu interesującej nas cechy elementu obiektu technicznego. W przypadku nieznajomości postaci rozkładu korzysta się z twierdzeń granicznych [18]. Przykładowo przedstawiony zostanie test pozwalający na weryfikację hipotezy dotyczącej postaci nieznanego rozkładu.

Niech dany będzie zbiór uszkodzeń, w którym ich rozkład prawdopodobieństwa w czasie jest nieznany.

Najprostszą metodą prowadzącą do uzyskania wstępnych informacji o postaci rozkładu interesujących nas uszkodzeń jest narysowanie histogramu rozkładu zaobserwowanego w danym zbiorze uszkodzeń. Uzyskane z rysunku informacje są jednak niepełne i oczywiście tylko „wzrokowe". Jednakże te „wzrokowe" informacje zawarte w histogramie pozwalają na zorientowanie się, jakie ewentualnie rozkłady mogą być brane pod uwagę. O ile na podstawie rys. 3.3 i przedstawionego tam $f(t)$ dopuszcza się możliwość przyjęcia rozkładu normalnego w populacji generalnej, o tyle w przypadku pokazanym na rys. 3.2 na podstawie wyznaczonej $\lambda(t)$ taka ewentualność nie powinna być brana pod uwagę, bo będzie to rozkład wykładniczy. Do oceny rozkładu na podstawie wzrokowego testu zgodności najlepiej jest wybrać postać funkcji rozkładu gęstości uszkodzeń $f(t)$ i intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$.



Rys. 3.2. Przykładowy histogram intensywności uszkodzeń $\lambda^*(t)$



Rys. 3.3. Przykładowy histogram gęstości uszkodzeń *f*(t)*

Oczywiście spostrzeżenia wynikające z kształtu histogramu nie mogą służyć za podstawę do jakichkolwiek ogólniejszych rozważań. Niezbędna jest bardziej precyzyjna miara zgodności między danymi eksperymentalnymi a hipotetycznym rozkładem cechy elementów zbioru.

Pierwszym krokiem powinno być ustalenie zbioru możliwych do przyjęcia hipotez, tzn. zbioru możliwych rozkładów, które mogą być brane pod uwagę. Kolejnym krokiem jest dobranie odpowiedniej statystyki, która może służyć za test do weryfikacji przyjętej hipotezy [16, 17, 28].

3.3.2. Weryfikacja rozkładów prawdopodobieństwa metodą graficzną

W praktyce inżynierskiej bardzo rozpowszechnione są graficzne metody wyznaczania rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych na podstawie danych doświadczalnych [8, 9, 19, 21]. Wykorzystuje się przy tym fakt, że najczęściej występującymi rozkładami czasu poprawnej pracy i czasu naprawy są rozkłady: wykładniczy, normalny, logarytmiczno-normalny i Weibulla (PN–79/N–04031).

Dane doświadczalne zestawia się w postaci tablicy, np. tab. 3.5, gdzie w kolumnie 1 wpisuje się wartości $x_i = t_i$ odpowiadające chwilom uszkodzeń, w kolumnie 2 – liczbę uszkodzeń $m_i(t)$ w zadanym przedziale czasowym, w kolumnie 3 – liczbę uszkodzeń M_i do danej chwili czasu, a w kolumnach 4 i 5 obliczone wartości $\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$ i $\left(1 - \frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$.

Tab. 3.5. Przykład zestawienia danych doświadczalnych

$x_i = t_i$	$m_i(t)$	M_i	$\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$	$1 - \frac{M_i}{\sum m_i(t)}$
1	2	3	4	5

W celu graficznego wyznaczenia rozkładu, wartości $\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$ lub $\left(1 - \frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$ nanosi się na odpowiednią siatkę współrzędnych:

a) przy sprawdzaniu zgodności z rozkładem wykładniczym wykorzystuje się siatkę funkcyjną, w której na osi odciętych naniesiona jest skala równomierna, a na osi rzędnych skala logarytmiczna (rys. 3.4),
b) przy sprawdzaniu zgodności z rozkładem normalnym wykorzystuje się siatkę funkcyjną, w której na osi odciętych naniesiona jest skala równomierna, a na osi rzędnych skala odpowiadająca rozkładowi normalnemu,
c) przy sprawdzaniu zgodności z rozkładem logarytmiczno-normalnym wykorzystuje się siatkę funkcyjną o skali logarytmicznej na osi odciętych i skali odpowiadającej rozkładowi normalnemu na osi rzędnych (rys. 3.5),
d) przy sprawdzaniu zgodności z rozkładem Weibulla wykorzystuje się specjalną siatkę funkcyjną tego rozkładu (rys. 3.6).

Wskazane jest przeprowadzenie sprawdzania w następującej kolejności rozkładów: wykładniczy, normalny, logarytmiczno-normalny, Weibulla.

Weryfikacja tego rodzaju polega na graficznym sprawdzeniu możliwości liniowej interpolacji danych doświadczalnych, wyznaczeniu największego odchylenia punktów doświadczalnych od prostej interpolacyjnej i ostatecznym sprawdzeniu według testu zgodności Kołmogorowa.

Dla liniowej interpolacji danych doświadczalnych punkty $\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$ lub $\left(1 - \frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$ nanosi się na wykresie wybranej siatki funkcyjnej, a następnie prowadzi się linię prostą między punktami tak, aby odchylenia punktów od prostej były najmniejsze. Jeżeli punkty są wyraźnie odchylone od prostej (wyznaczają linię krzywą), to sprawdzenie należy przeprowadzić przy pomocy siatki funkcyjnej innego rozkładu.

Jako najważniejsze odchylenie *D* punktów doświadczalnych od prostej interpolacyjnej przyjmuje się maksymalne odchylenie tych punktów liczone według osi rzędnych siatki funkcyjnej.

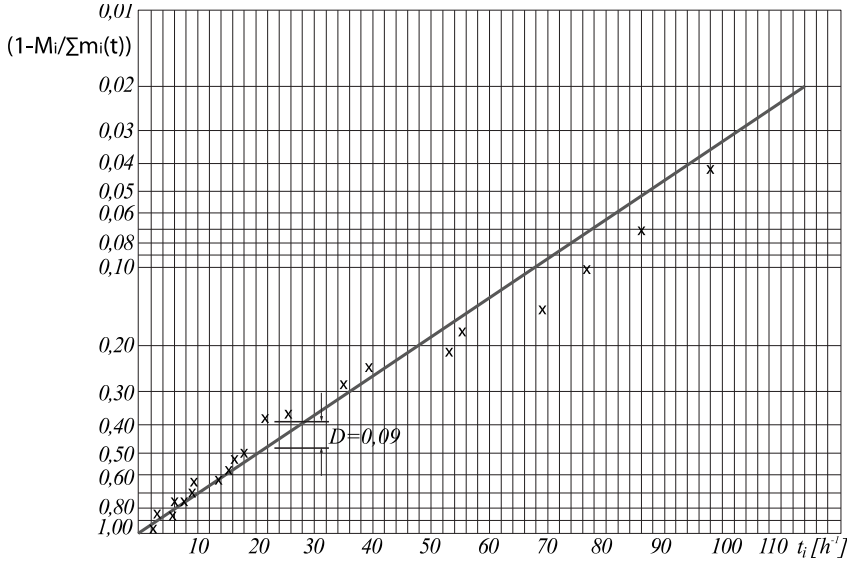
Sprawdzenie zgodności przy pomocy testu (kryterium) Kołmogorowa polega na wyznaczeniu wartości:

$$D\sqrt{m} \tag{3.30}$$

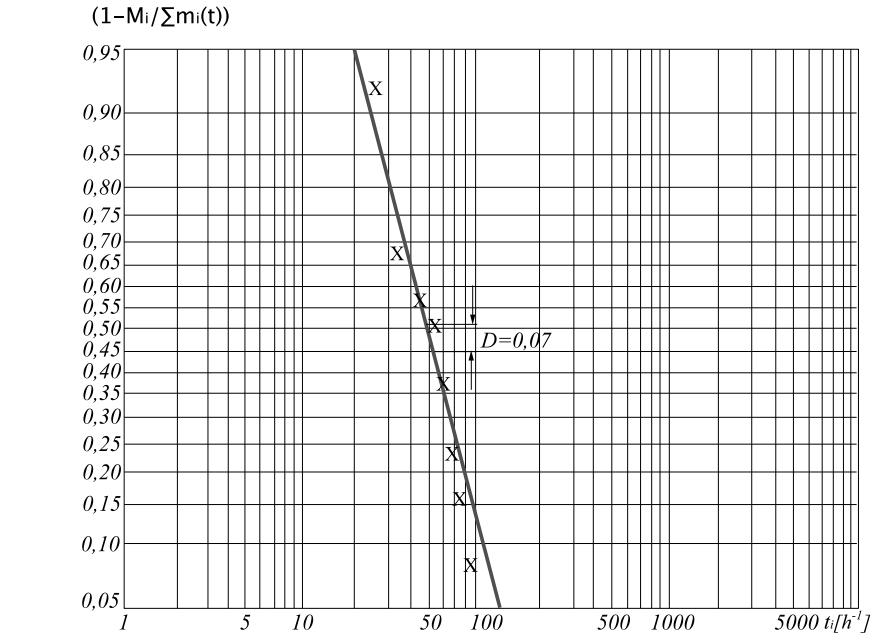
gdzie: D – największe odchylenie punktów od prostej interpolacyjnej, M – liczba doświadczalnie otrzymanych punktów.

Jeżeli $D\sqrt{m} \leq 1$, to nie ma podstaw do kwestionowania zgodności danego rozkładu empirycznego z założonym rozkładem teoretycznym, jeżeli natomiast $D\sqrt{m} > 1$, to hipotezę o zgodności wymienionych rozkładów trzeba odrzucić i należy przeprowadzić weryfikację dla następnego przyjętego rozkładu teoretycznego.

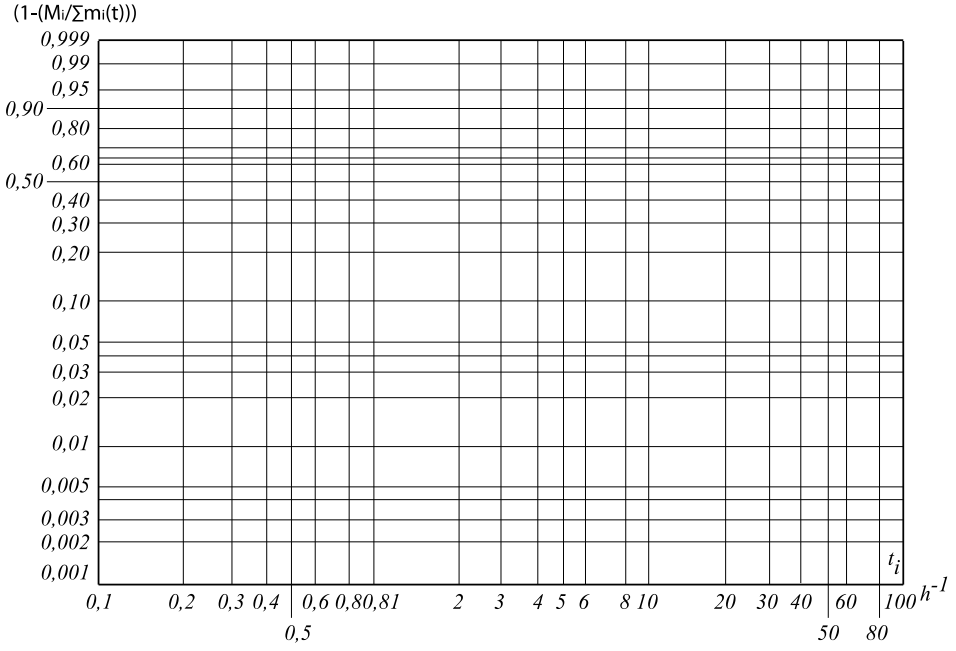
Po ustaleniu zgodności rozkładu empirycznego z założonym rozkładem teoretycznym można wyznaczyć graficznie niektóre parametry przyjętego rozkładu. I tak w przypadku rozkładu wykładniczego punktowi prostej interpolacyjnej o rzędnej 0,40 odpowiada na osi odciętych wartość t = 19,0 (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Siatka do sprawdzenia zgodności danych eksperymentalnych z rozkładem wykładniczym



Rys. 3.5. Siatka do sprawdzenia zgodności danych eksperymentalnych z rozkładem logarytmiczno-normalnym



Rys. 3.6. Siatka do sprawdzenia zgodności danych eksperymentalnych z rozkładem Weibulla

Przykład 1

W wyniku opracowania danych doświadczalnych otrzymano następujący szereg wartości czasu poprawnej pracy obiektu w godzinach: 2; 2; 3; 3; 5; 6; 7; 8; 9; 9; 13; 15; 16; 17; 18; 20; 21; 25; 27; 35; 38; 53; 56; 69; 77; 86; 98; 120. Należy wyznaczyć rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy danego obiektu.

Rozwiązanie

1. Zestawiamy dane doświadczalne w tab. 3.6 i obliczamy wartości odpowiadające poszczególnym kolumnom.
2. W celu sprawdzenia zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem wykładniczym nanosimy punkty o współrzędnych t_i i $\left(1 - \frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$ na siatkę funkcyjną rozkładu wykładniczego (rys. 3.4).
3. Przeprowadzamy liniową interpolację punktów doświadczalnych, a ponieważ jest ona w danym przypadku możliwa, wyznaczamy największe odchylenie punktów od prostej, które jest równe $D = 0{,}09$.
4. Przeprowadzamy ocenę według testu (kryterium) Kołmogorowa:

$$D\sqrt{m} = 0{,}09\sqrt{28} = 0{,}48 < 1{,}0 \tag{3.31}$$

Ponieważ spełniona jest nierówność $D\sqrt{m} \leq 1{,}0$, to nie ma podstaw do kwestionowania zgodności danego rozkładu empirycznego z założonym rozkładem wykładniczym.

Można zatem przyjąć, że rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy danego wyrobu jest rozkładem wykładniczym.

Przykład 2

W wyniku opracowania danych doświadczalnych otrzymano następujące czasy (w godzinach) uszkodzeń aparatury przy badaniach przyspieszonych: 12; 25; 34; 34; 34; 34; 34; 34; 45; 45; 45; 53; 61; 61; 61; 61; 69; 69; 69; 75; 75; 84; 84; 92; 95. Należy wyznaczyć rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy badanej aparatury.

Rozwiązanie

1. Dane doświadczalne zestawiamy w tab. 3.7 i obliczamy wartości odpowiadające poszczególnym kolumnom.
2. W celu sprawdzenia zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem wykładniczym nanosimy punkty o współrzędnych t_i i $\left(1-\frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$ na siatkę funkcyjną rozkładu wykładniczego (rys. 3.7). Jak widać z rysunku, układ punktów wyklucza możliwość interpolacji liniowej, a zatem dany rozkład empiryczny nie może być opisany rozkładem wykładniczym.
3. Analogicznie sprawdzamy zgodność z rozkładem normalnym. Okazuje się, że liniowa interpolacja jest również i w tym przypadku niemożliwa.
4. Z kolei nanosimy punkty t_i i $\left(1-\frac{M_i}{\sum m_i(t)}\right)$ na siatkę funkcyjną rozkładu logarytmiczno-normalnego (rys. 3.5). Układ punktów pozwala stwierdzić, że interpolacja liniowa jest możliwa.
5. Prowadzimy przez otrzymane punkty prostą interpolacyjną i wyznaczamy największe odchylenie punktów od prostej, które w tym przypadku wynosi D=0,07.
6. Przeprowadzamy ocenę zgodności rozkładów przy pomocy testu Kołmogorowa:

$$D\sqrt{m} = 0{,}07\sqrt{25} = 0{,}35 < 1{,}0 \tag{3.32}$$

Ponieważ spełniona jest nierówność $D\sqrt{m} \leq 1{,}0$, to nie ma podstaw do kwestionowania zgodności danego rozkładu empirycznego z założonym rozkładem logarytmiczno-normalnym.

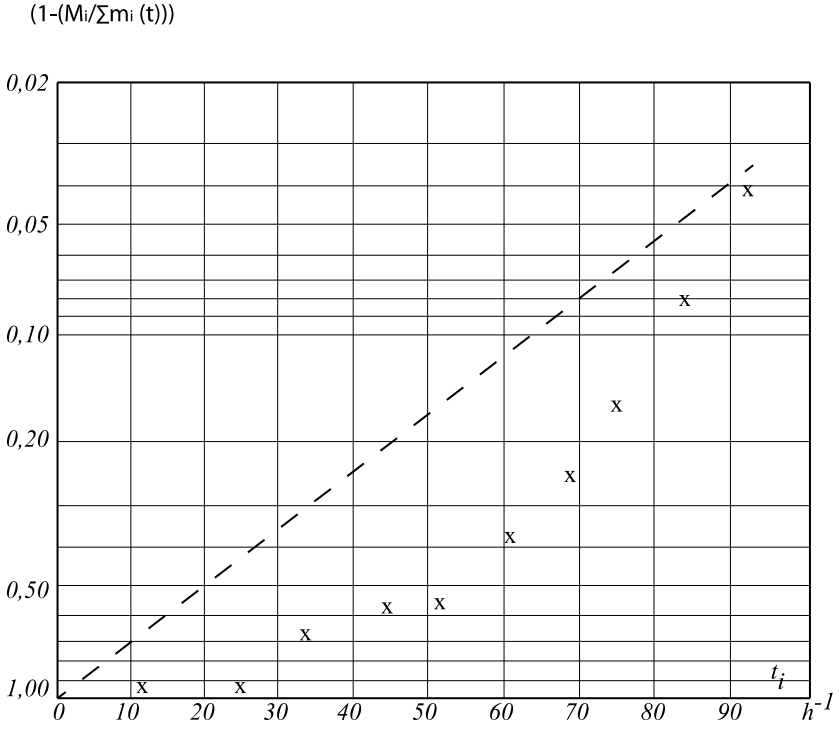
Można zatem przyjąć, że rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy aparatury jest rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Tab. 3.6. Dane doświadczalne czasu poprawnej pracy

t_i	$m_i(t)$	M_i	$\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$	$1-\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$
2	2	2	0,08	0,92
3	2	4	0,16	0,84
5	1	5	0,18	0,82
6	1	6	0,21	0,79
7	1	7	0,25	0,75
8	1	8	0,29	0,71
9	2	10	0,36	0,64
13	1	11	0,39	0,61
15	1	12	0,43	0,57
16	1	13	0,47	0,53
17	1	14	0,50	0,50
18	1	15	0,54	0,46
20	1	16	0,57	0,43
21	1	17	0,61	0,39
25	1	18	0,64	0,36
27	1	19	0,68	0,32
35	1	20	0,72	0,28
38	1	21	0,75	0,25
53	1	22	0,79	0,21
56	1	23	0,82	0,18
69	1	24	0,86	0,14
77	1	25	0,89	0,11
86	1	26	0,93	0,07
98	1	27	0,96	0,04
120	1	28	1,00	0,00
-	$\sum m_i(t) = 28$	M=28	-	-

Tab. 3.7. Dane doświadczalne czasu poprawnej pracy

t_i	$m_i(t)$	M_i	$\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$	$1-\frac{M_i}{\sum m_i(t)}$
12	1	1	0,04	0,96
25	1	2	0,08	0,92
34	6	8	0,32	0,68
45	3	11	0,44	0,56
53	1	12	0,48	0,52
61	4	16	0,64	0,36
69	3	19	0,76	0,24
75	2	21	0,84	0,16
84	2	23	0,92	0,08
92	1	24	0,96	0,04
90	1	25	1,00	0,00
-	$\sum m_i(t) = 25$	M=25	-	-



Rys. 3.7. Siatka do sprawdzenia zgodności danych eksperymentalnych z rozkładem wykładniczym

3.4. Podsumowanie

W systemie eksploatacji wiele obiektów tego samego typu sprowadza się do wielu „średnich" obiektów. Prosto rzecz ujmując, opis zachowania się obiektów zbioru można sprowadzić do przedstawienia wskaźników niezawodnościowych uśrednionego obiektu z tego zbioru. Typowe wskaźniki niezawodności (zawodność) opisane są w PN zdeterminowanymi charakterystykami i parametrami niezawodnościowymi. Są to: funkcja niezawodności *R(t)*, funkcja zawodności *F(t),* funkcja gęstości uszkodzeń *f(t)*, funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$, wartość oczekiwana czasu zdatności (życia) *E(T)* i wartość odchylenia standardowego oczekiwanego czasu życia $\sigma_{E(T)}$. Wskaźniki niezawodności (charakterystyki i parametry) obiektu są kompleksową informacją określającą naturę jego właściwości eksploatacyjnych. Stanowią potrzebną bazę do planowania prac obsługowych. Do opisu wskaźników niezawodności (charakterystyk i parametrów) obiektu technicznego stosuje się polskie normy: PN–77/N–04010 – Niezawodność w technice – wybór wskaźników niezawodności dla obiektów technicznych dwustanowych produkowanych masowo lub seryjnie, PN–77/N–04005 – Niezawodność w technice – wskaźniki niezawodności – nazwy, określenie, symbole. Wskaźniki niezawodności wyznaczane są na różnych etapach życia obiektu. Etapami tymi są:

- projekt wstępny,
- projekt techniczny,
- prototyp,
- partia próbna,
- produkcja seryjna,
- eksploatacja.

Miary niezawodności na początku są ustalane arbitralnie, a następnie weryfikowane na różnych etapach życia obiektu z danego zbioru np. testem Kołmogorowa. Na uwagę zasługuje możliwość wyznaczenia wskaźników niezawodności pojedynczych obiektów, co wynika z ergodyczności strumienia uszkodzeń. Przedstawione w pracy tabele, wytyczne, weryfikacja rozkładów są podane w taki sposób, że mogą być bezpośrednio zastosowane w procesie eksploatacji do wyznaczenia charakterystyk i przede wszystkim parametrów niezawodności.

3.5. Spis literatury

1. Bobrowski D.: *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1985.
2. Bobrowski D.: *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*, WNT, Warszawa 1986.
3. Bojarski W.W.: *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych*, PWN, Warszawa 1967.
4. Boliński B., Stelmaszczyk Z.: *Eksploatacja silników turbinowych*, WKŁ, Warszawa 1981.
5. Borgoń J., Jaźwiński J., Klimaszewski S., Żmudziński Z., Żurek J.: *Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów*, Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa 1998.
6. Borowczyk H., Lindstedt P., Manerowski J.: *Premises for a practical computer-aided parametric method of evaluation of the technical object reliability*, "Journal of KONES", Vol. 16, no. 12/2009, PAN, Warszawa 2009.
7. Bubnicki Z.: *Identyfikacja obiektów sterowania*, PWN, Warszawa 1974.
8. Gniadek B.W.: *Metody matematyczne w teorii niezawodności obiektów technicznych*, PWN, Warszawa 1986.
9. Hebda M., Janicki D.: *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji*, WKiŁ, Warszawa 1977.
10. Hebda M., Mazur T.: *Podstawy eksploatacji pojazdów samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 1980.
11. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., Żurek J.: *Wybrane rozkłady prawdopodobieństwa wykorzystywane w symulacyjnych badaniach bezpieczeństwa systemów transportowych*, ZEM PAN, zeszyt 2 (102), Vol. 30, 1995.
12. Kopociński A.: *Zarys teorii odnowy i niezawodności*, PWN, Warszawa 1973.
13. Lewitowicz J., Borgoń J., Zabkowicz W.: *Podstawy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, t. I i II, Wyd. ITWL, Warszawa 1993.
14. Lindstedt P., Sudakowski T.: *Prediction the bearing reliability on basis diagnostics information*, "Journal of KONBIN", No. 3/2007, Warsaw 2007.
15. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa 2002.
16. Migalski J. (red.): *Inżynieria niezawodności*, Poradnik ZETOM, Warszawa 1992.
17. *Niezawodność w technice*. Zestaw Norm, Wyd. Normalizacyjne ALFA – WERO, Warszawa 1997.
18. Plucińska A., Pluciński E.: *Elementy probabilistyki*, PWN, Warszawa 1981.
19. Sotskow B.S.: *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*, WNT, Warszawa 1973.
20. Staniszewski R.: *Cybernetyczna teoria projektowania*, Ossolineum, Wrocław 1986.

21. Sztarski M.: *Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych*, WKiŁ, Warszawa 1972.
22. Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J.: *Niezawodność systemów technicznych*, WNT, Warszawa 1990.
23. Woropay M.: *Diagnostyka i niezawodność systemów technicznych*, „Postępy cybernetyki", Ossolineum, zeszyt 2/1983.
24. Woropay M. (red.): *Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn*, ITE – ATR, Radom–Bydgoszcz 1996.
25. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*, ATR, Bydgoszcz 1996.
26. Żółtowski B.: *Doskonalenie systemu eksploatacji maszyn*, WSOWRiA, Toruń 1986.
27. Żurek J., Krutkow A., Stawiński Ł.: *Symulacyjne badania algorytmu doboru modelu matematycznego rozkładu*. Materiały Szkoły Zimowej Niezawodności, Szczyrk 1991.
28. Żurek J.: *Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie*, „Przegląd WLOP", nr 12/2001, Wyd. EMPA, Poznań 2001.

4

PREDYKCJA PARAMETRÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH JEDNOSTKOWEGO OBIEKTU W PROCESIE EKSPLOATACJI

4.1. Wybór kodu układu łożyskowania zespołu pompowego

Analizując podatność na naprawę układu, ograniczenia czasu eksploatacji, rodzaj pracy i możliwość kontynuacji pracy po wystąpieniu uszkodzenia układu, stwierdza się, że:

- łożyska z układu łożyskowania są obiektem nienaprawialnym, zatem zgodnie z tabelą 3.3 pierwszą cyfrą kodu jest 1,
- łożyska pracują do osiągnięcia resursu (stanu granicznego), zatem zgodnie z tabelą 3.3 drugą cyfrą kodu jest 2,
- łożyska pracują z losowymi przerwami wynikającymi z włączeń i wyłączeń zespołu pompowego, zatem zgodnie z tabelą 3.3 trzecią cyfrą kodu jest 3,
- łożyska nie mogą pracować po wystąpieniu uszkodzenia, zatem czwartą cyfrą kodu jest 2.

Ostatecznie stwierdza się, że łożyska z układu łożyskowania identyfikowane są kodem 1232, a to oznacza, że zgodnie z tabelą 3.4 podstawową charakterystyką niezawodności jest *R(t)*, czyli prawdopodobieństwo poprawnej pracy układu łożyskowania zespołu pompowego. Przy czym *R(t)* oblicza się ze wzoru:

$$R(t)=1-F(t) \tag{4.1}$$

gdzie: *F(t)* – zawodność (prawdopodobieństwo uszkodzenia).

4.2. Zasada przetwarzania danych eksploatacyjnych (liczba uszkodzeń, liczność zbioru, czas powstania uszkodzeń) na parametry niezawodności

Moment powstania uszkodzenia $\Delta\theta$, liczba uszkodzeń $m(t)$ (tab. 2.7 a i b, tab. 2.11 a i b) oraz całkowita liczność zbioru uszkodzeń n (wzór 3.21) są podstawą do wyznaczenia odpowiednich estymatorów zawodności $F^*(t)$ i estymatorów niezawodności $R^*(t)$, a następnie do określenia charakterystyk niezawodnościowych $R(t)$ badanych łożysk dwóch zespołów pompowych. Liczbę uszkodzeń $m(t)$ wyznacza się na podstawie zaistniałych przekroczeń progów diagnostycznych (pkt. 2.4). Estymatory zawodności i niezawodności wyznacza się ze wzorów 3.13÷3.14. Liczność badanego zbioru łożysk n ustala się ze wzorów 3.18 lub 3.19 wynikających z ergodyczności strumienia uszkodzeń pojedynczego łożyska (odpowiednio długa obserwacja jednego łożyska jest równoważna obserwacji dużego zbioru łożysk).

Charakterystyka niezawodności $R(t)$ jest podstawą do wyznaczenia parametrów niezawodności $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ z zależności:

$$E(T) = \int_0^\infty R(t)dt \tag{4.2}$$

$$E(T) = 2\int_0^\infty tR(t)dt \tag{4.3}$$

$$\sigma_{E(T)} = \sqrt{E(T^2) - [E(T)]^2} \tag{4.4}$$

Oczekiwany czas życia $E(T)$ i odchylenie standardowe oczekiwanego czasu życia $\sigma_{E(T)}$ są parametrami niezawodności, które pozwalają obserwować i porównywać różne obiekty tego samego typu w różnych okresach eksploatacji.

4.3. Parametry niezawodności łożysk zespołów pompowych i ich przykładowa interpretacja

Przy obliczaniu niezawodności obiektu technicznego należy wyznaczyć *R(t)*. Obliczenia powinny uwzględniać trzy podstawowe uszkodzenia: katastroficzne, parametrycznie i chwilowe. W analizie niezawodnościowej przyjmuje się, że [11]:

$$R(t)=R_a(t)R_b(t)R_c(t) \tag{4.5}$$

gdzie: $R_a(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia katastroficzne, $R_b(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia parametryczne, $R_c(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia chwilowe.

Gdy wyznacza się charakterystykę *R(t)* przed wystąpieniem uszkodzeń katastroficznych $R_a(t)=1$, to wtedy:

$$R(t)=R_b(t)R_c(t) \tag{4.6}$$

a ich estymatory wynoszą:

$$R^*(t)=R_b^*(t)R_c^*(t) \tag{4.7}$$

Przykładowe obliczenia parametrów niezawodności *E(T)* i $\sigma_{E(T)}$ przeprowadzono w tabelach 4.1÷4.2. Obliczenia wykonano na podstawie wzorów 4.2÷4.4 z wykorzystaniem rys. 4.1 a, b i 4.2 a, b.

Tab. 4.1 a. Wyniki obliczeń dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 3 (dane z tab. 2.7 a dla progu 0,5 *s*)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$R_b^*(t)$	$R_c^*(t)$	$R^*(t)$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$
8329	0	1,00	1,00	1,00	217,09	191,23
8354	25	1,00	1,00	1,00		
8401	72	1,00	0,81	0,81		
8442	113	0,80	0,81	0,65		
8487	158	0,60	0,61	0,37		
8531	202	0,60	0,42	0,25		
8578	249	0,60	0,42	0,25		
8602	273	0,60	0,42	0,25		
8648	319	0,60	0,42	0,25		
8675	346	0,60	0,42	0,25		
8699	370	0,60	0,42	0,25		
8744	415	0,60	0,42	0,25		
8769	440	0,40	0,42	0,17		
8819	490	0,40	0,42	0,17		
8838	509	0,40	0,42	0,17		
8861	532	0,40	0,42	0,17		
8909	580	0,20	0,23	0,05		
8937	608	0,20	0,23	0,05		
8982	653	0,20	0,23	0,05		
9006	677	0,20	0,03	0,01		
9029	700	0,00	0,03	0,00		
14880	0	1,00	1,00	1,00	177,05	141,85
14920	40	1,00	1,00	1,00		
14960	80	0,86	0,86	0,73		
15003	123	0,86	0,86	0,73		
15033	153	0,71	0,71	0,51		
15073	193	0,57	0,57	0,33		
15100	220	0,43	0,43	0,18		
15140	260	0,43	0,29	0,12		
15182	302	0,43	0,29	0,12		
15206	326	0,43	0,29	0,12		
15312	432	0,43	0,29	0,12		
15352	472	0,43	0,29	0,12		
15358	478	0,29	0,14	0,04		
15407	527	0,29	0,14	0,04		
15431	551	0,14	0,14	0,02		
15461	581	0,14	0,14	0,02		
15540	660	0,14	0,14	0,02		
15612	732	0,14	0,14	0,02		
15685	805	0,14	0,14	0,02		
15691	811	0,00	0,00	0,00		

Tab. 4.1 b. Wyniki obliczeń dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 3 (dane z tab. 2.7 b dla progu 0,5 *s*) – warunki początkowe

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$R_b^*(t)$	$R_a^*(t)$	R*(t)	E(T)	$\sigma_{E(T)}$
8329	0	1,00	1,00	1,00	263,43	173,71
8354	25	1,00	1,00	1,00		
8401	72	1,00	0,92	0,92		
8442	113	0,92	0,92	0,85		
8487	158	0,83	0,85	0,71		
8531	202	0,83	0,77	0,64		
8578	249	0,75	0,77	0,58		
8602	273	0,75	0,77	0,58		
8648	319	0,67	0,69	0,46		
8675	346	0,58	0,62	0,36		
8699	370	0,50	0,54	0,27		
8744	415	0,42	0,54	0,22		
8769	440	0,33	0,54	0,18		
8819	490	0,33	0,54	0,18		
8838	509	0,33	0,46	0,15		
8861	532	0,25	0,38	0,10		
8909	580	0,17	0,31	0,05		
8937	608	0,17	0,23	0,04		
8982	653	0,17	0,15	0,03		
9006	677	0,08	0,08	0,01		
9029	700	0,00	0,00	0,00		
14880	0	1,00	1,00	1,00	245,61	150,46
14920	40	1,00	1,00	1,00		
14960	80	0,94	0,91	0,86		
15003	123	0,88	0,82	0,72		
15033	153	0,82	0,73	0,60		
15073	193	0,76	0,64	0,49		
15100	220	0,71	0,55	0,39		
15140	260	0,65	0,45	0,29		
15182	302	0,59	0,36	0,21		
15206	326	0,53	0,27	0,14		
15312	432	0,53	0,27	0,14		
15352	472	0,47	0,18	0,09		
15358	478	0,41	0,09	0,04		
15407	527	0,35	0,09	0,03		
15431	551	0,29	0,09	0,03		
15461	581	0,24	0,09	0,02		
15540	660	0,18	0,09	0,02		
15612	732	0,12	0,09	0,01		
15685	805	0,06	0,09	0,01		
15691	811	0,00	0,00	0,00		

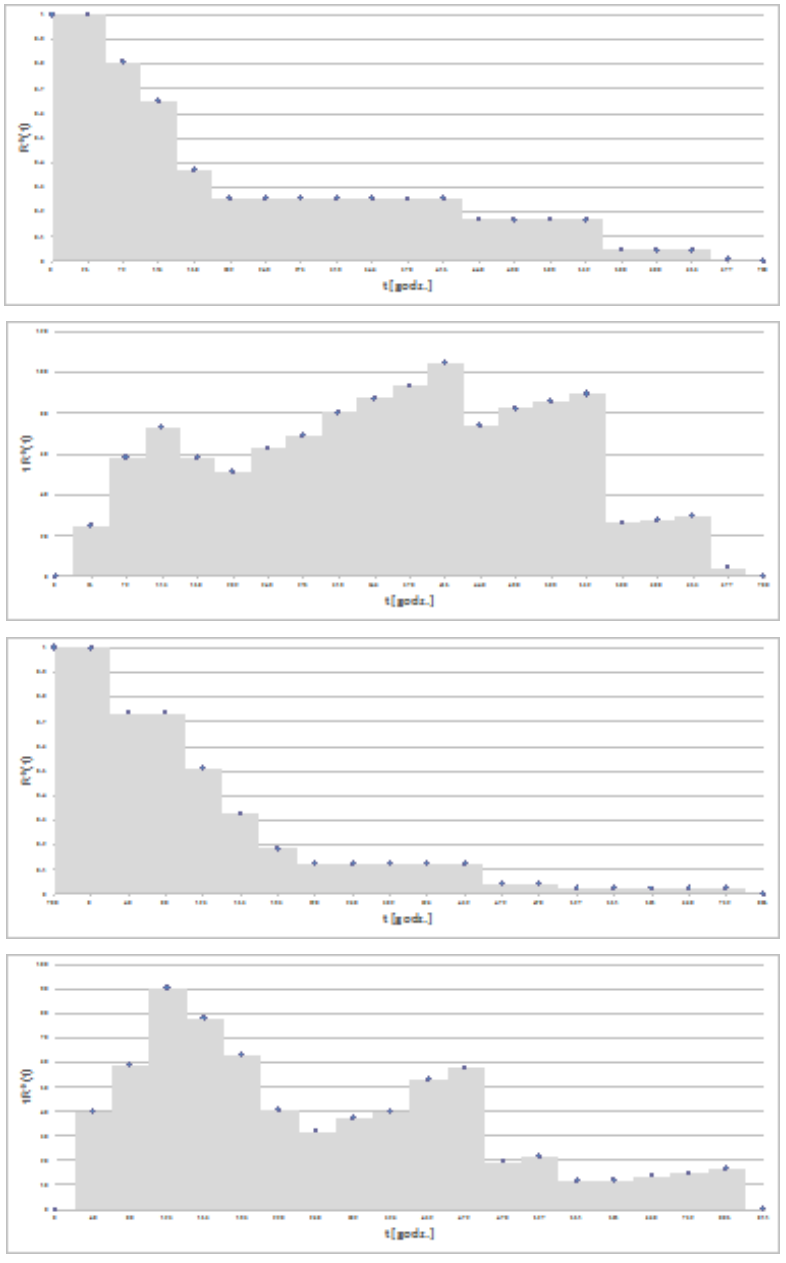
Tab. 4.2 a. Wyniki obliczeń dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 4 (dane z tab. 2.8 a dla progu 0,5 *s*)

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$R_b^*(t)$	$R_c^*(t)$	$R^*(t)$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$
8329	0	1,00	1,00	1,00		
8354	25	1,00	1,00	1,00		
8401	72	0,91	0,86	0,78		
8442	113	0,82	0,86	0,70		
8487	158	0,73	0,86	0,62		
8531	202	0,73	0,86	0,62		
8578	249	0,64	0,71	0,45		
8602	273	0,55	0,71	0,39		
8648	319	0,55	0,71	0,39		
8675	346	0,45	0,57	0,26		
8699	370	0,36	0,43	0,16	255,55	181,10
8744	415	0,36	0,43	0,16		
8769	440	0,36	0,43	0,16		
8819	490	0,36	0,43	0,16		
8838	509	0,27	0,29	0,08		
8861	532	0,27	0,29	0,08		
8909	580	0,27	0,29	0,08		
8937	608	0,27	0,29	0,08		
8982	653	0,27	0,29	0,08		
9006	677	0,27	0,14	0,04		
9029	700	0,27	0,00	0,00		
14880	0	1,00	1,00	1,00		
14920	40	1,00	1,00	1,00		
14960	80	0,80	0,89	0,71		
15003	123	0,80	0,89	0,71		
15033	153	0,80	0,78	0,62		
15073	193	0,60	0,67	0,40		
15100	220	0,40	0,56	0,22		
15140	260	0,40	0,45	0,18		
15182	302	0,40	0,45	0,18		
15206	326	0,40	0,34	0,14		
15312	432	0,40	0,34	0,14	201,72	153,23
15352	472	0,40	0,34	0,14		
15358	478	0,20	0,23	0,05		
15407	527	0,20	0,23	0,05		
15431	551	0,20	0,12	0,02		
15461	581	0,20	0,12	0,02		
15540	660	0,20	0,12	0,02		
15612	732	0,20	0,12	0,02		
15685	805	0,20	0,01	0,00		
15691	811	0,00	0,01	0,00		

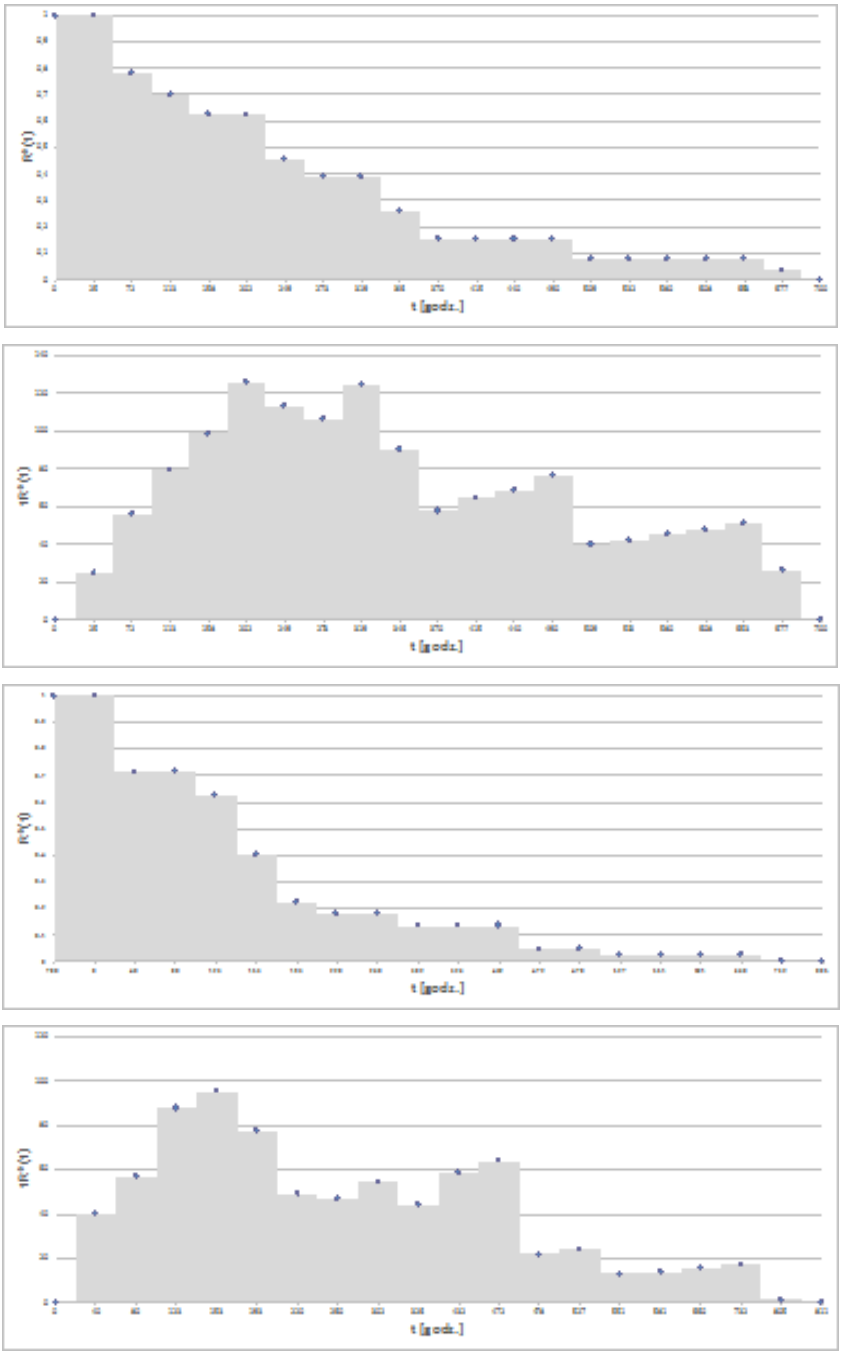
Tab. 4.2 b. Wyniki obliczeń dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 4 (dane z tab. 2.8 b dla progu 0,5 *s*) – warunki początkowe

θ [godz.]	$\theta_{obs.}$ [godz.]	$R_b^*(t)$	$R_c^*(t)$	$R^*(t)$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$
8329	0	1,00	1,00	1,00	257,86	177,29
8354	25	1,00	1,00	1,00		
8401	72	0,86	0,83	0,71		
8442	113	0,71	0,83	0,60		
8487	158	0,57	0,67	0,38		
8531	202	0,57	0,67	0,38		
8578	249	0,57	0,67	0,38		
8602	273	0,43	0,67	0,29		
8648	319	0,43	0,50	0,21		
8675	346	0,43	0,50	0,21		
8699	370	0,43	0,50	0,21		
8744	415	0,43	0,50	0,21		
8769	440	0,43	0,50	0,21		
8819	490	0,29	0,50	0,14		
8838	509	0,29	0,50	0,14		
8861	532	0,14	0,50	0,07		
8909	580	0,14	0,50	0,07		
8937	608	0,14	0,50	0,07		
8982	653	0,14	0,33	0,05		
9006	677	0,14	0,17	0,02		
9029	700	0,00	0,00	0,00		
14880	0	1,00	1,00	1,00	276,04	184,08
14920	40	1,00	1,00	1,00		
14960	80	1,00	0,92	0,92		
15003	123	0,81	0,83	0,68		
15033	153	0,81	0,75	0,61		
15073	193	0,81	0,67	0,54		
15100	220	0,81	0,58	0,48		
15140	260	0,81	0,50	0,41		
15182	302	0,81	0,50	0,41		
15206	326	0,81	0,50	0,41		
15312	432	0,81	0,42	0,34		
15352	472	0,63	0,42	0,26		
15358	478	0,44	0,34	0,15		
15407	527	0,44	0,34	0,15		
15431	551	0,25	0,25	0,06		
15461	581	0,25	0,25	0,06		
15540	660	0,25	0,25	0,06		
15612	732	0,25	0,25	0,06		
15685	805	0,25	0,25	0,06		
15691	811	0,25	0,25	0,06		

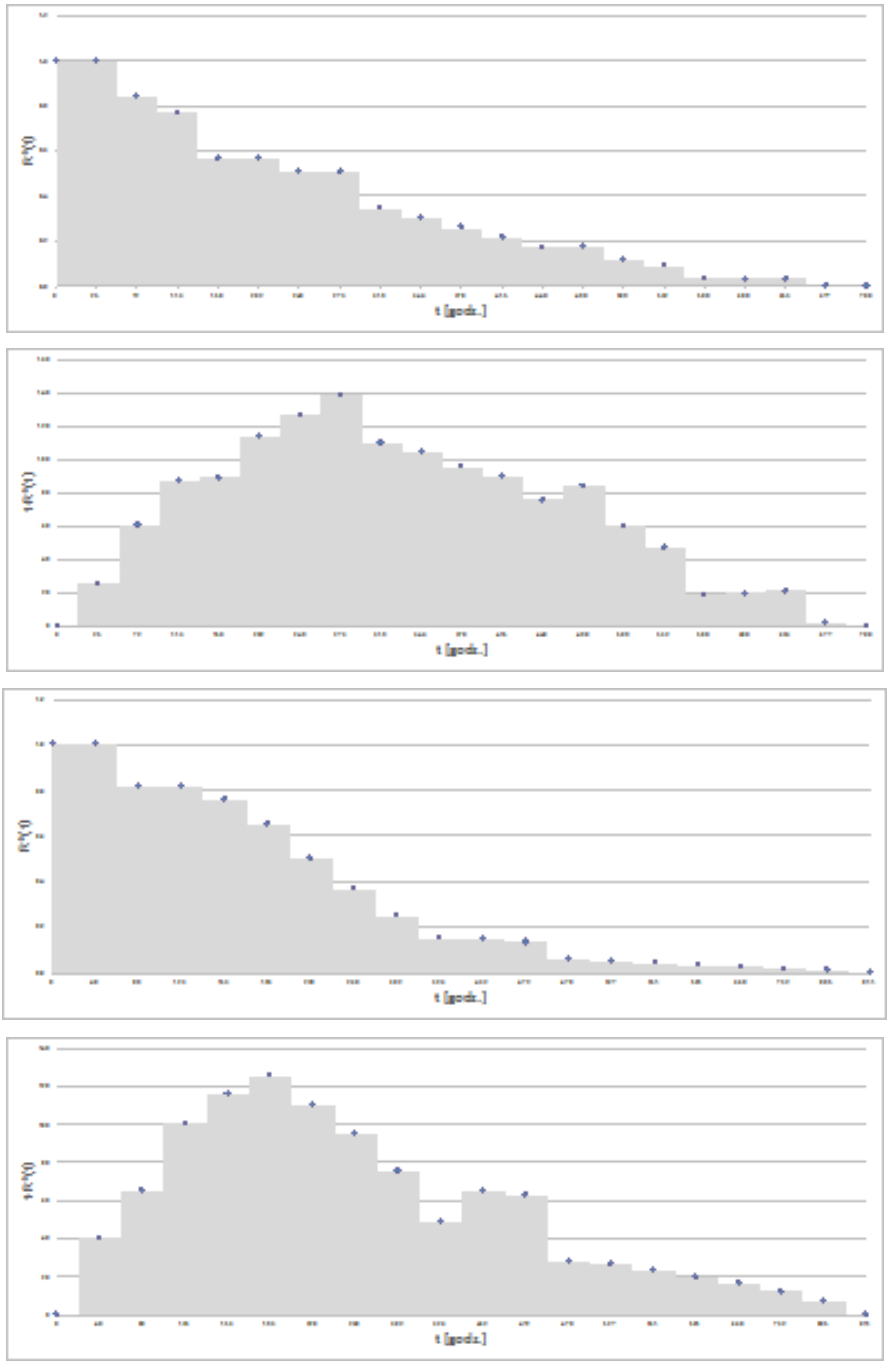
Wykresy (przebiegi) estymatorów *R*(t)* i *tR(t)* przedstawiono na rys. 4.1 a, 4.1 b, 4.2 a, 4.2 b.



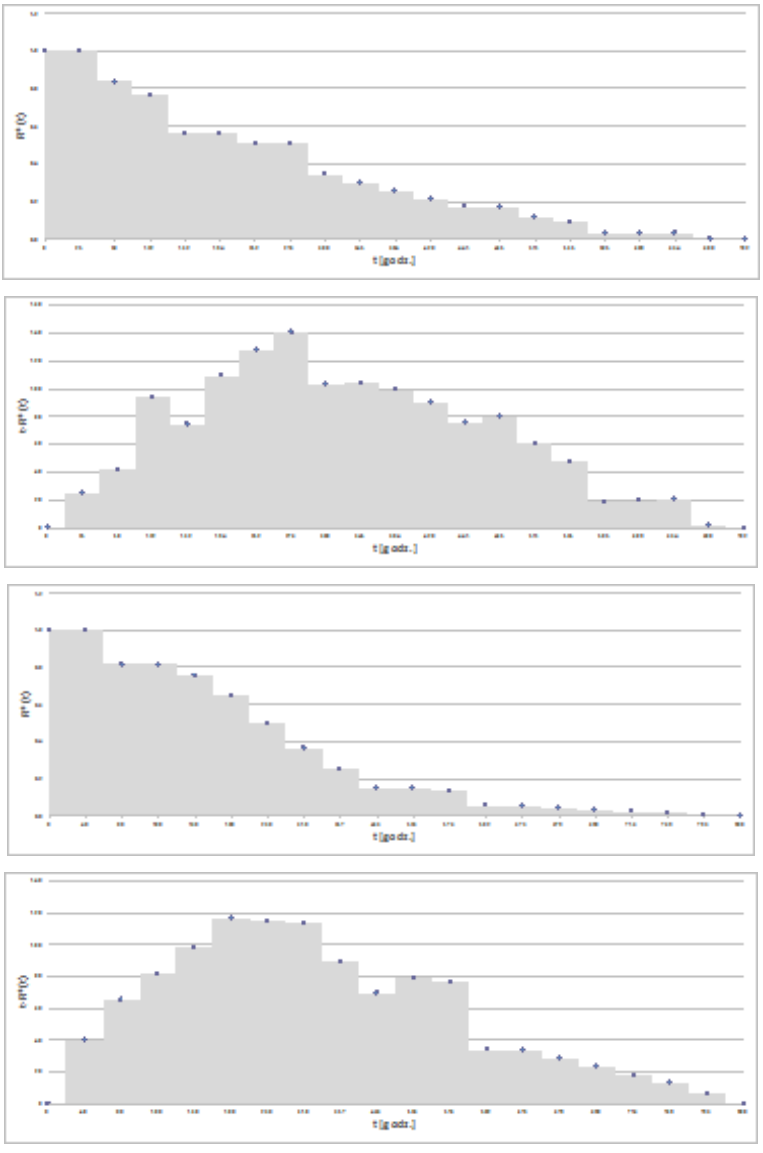
Rys. 4.1 a. Ciągi wartości estymatorów *R*(t)* i *tR*(t)* dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 3



Rys. 4.1 b. Ciągi wartości estymatorów *R*(t)* i *tR*(t)* dla dwóch okresów obserwacji zespołu pompowego nr 4



Rys. 4.2 a. Ciągi wartości estymatorów *R*(t)* i *tR*(t)* dla dwóch okresów obserwacji dla zespołu pompowego nr 3 z uwzględnieniem warunków początkowych



Rys. 4.2 b. Ciągi wartości estymatorów *R*(t)* i *tR*(t)* dla dwóch okresów obserwacji dla zespołu pompowego nr 4 z uwzględnieniem warunków początkowych

Zbiorcze wyniki obliczeń parametrów $E(T)$ *i* $\sigma_{E(T)}$ dla dwóch zespołów pompowych, dwóch okresów obserwacji, czterech progów statystycznych diagnostycznych (0,25 s, 0,5 s, 0,75 s, s) oraz progu wg Lindeberga – Levy'ego i dwóch różnych modeli identyfikacji uszkodzeń (bez warunków początkowych i z uwzględnieniem warunków początkowych) przedstawiono w tabelach 4.3÷4.6.

Tab. 4.3. Zestawienie wyników obliczeń $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ dla zespołu pompowego nr 3

Próg diagnostyczny	Okres obserwacji							
	I okres obserwacji				II okres obserwacji			
	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$
0,25 s	242,04	183,70	58,34	425,74	174,03	137,00	37,02	311,04
0,5 s	217,09	191,23	25,86	408,32	177,05	141,85	40,94	337,32
0,75s	237,30	195,21	42,09	432,51	216,08	197,81	18,27	413,89
s	347,56	249,58	97,98	597,14	197,87	198,37	0	396,24
Lindeberg-Levy	281,10	146,02	135,08	427,12	324,53	161,71	162,82	486,24

Tab. 4.4. Zestawienie wyników obliczeń $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ dla zespołu pompowego nr 4

Próg diagnostyczny	Okres obserwacji							
	I okres obserwacji				II okres obserwacji			
	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$
0,25 s	233,86	145,58	88,28	379,44	204,99	139,41	65,58	344,40
0,5 s	255,55	181,10	74,45	436,65	201,72	153,23	48,49	354,95
0,75s	328,89	201,79	127,10	530,68	200,13	158,79	41,34	358,92
s	353,99	203,78	150,21	557,77	187,13	150,34	36,79	337,47
Lindeberg-Levy	307,20	190,56	116,64	497,76	247,48	170,68	76,80	418,16

Tab. 4.5. Zestawienie wyników obliczeń $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ dla zespołu pompowego nr 3 z uwzględnieniem warunków początkowych

Próg diagnostyczny	Okres obserwacji							
	I okres obserwacji				II okres obserwacji			
	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$
0,25 s	276,17	180,73	95,44	456,90	257,15	176,69	80,46	433,84
0,5 s	263,43	173,71	89,72	437,14	245,61	150,46	95,15	396,07
0,75s	271,65	183,41	88,24	455,06	278,25	166,92	111,33	445,17
s	339,62	183,73	155,89	523,35	340,25	139,46	200,79	479,71
Lindeberg-Levy	277,43	160,94	116,49	438,37	277,41	173,83	103,95	450,87

Tab. 4.6. Zestawienie wyników obliczeń $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ dla zespołu pompowego nr 4 z uwzględnieniem warunków początkowych

Próg diagnostyczny	Okres obserwacji							
	I okres obserwacji				II okres obserwacji			
	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$	$E(T)$	$\sigma_{E(T)}$	$E(T)_{min}$	$E(T)_{max}$
0,25 s	270,12	183,66	88,46	453,78	285,66	216,22	69,44	501,88
0,5 s	257,86	177,29	80,57	435,15	276,04	184,08	91,96	460,12
0,75s	265,55	186,93	78,62	452,48	324,76	198,10	126,66	522,86
s	335,93	185,94	149,99	521,78	401,44	160,25	241,19	561,69
Lindeberg-Levy	272,43	164,08	108,35	436,51	317,25	220,52	96,73	537,77

Analiza wyników przedstawionych w tab. 4.3÷4.6 pozwala porównywać stan niezawodnościowy różnych obiektów i tego samego obiektu w różnych okresach eksploatacji.

Z tab. 4.3 dla progu 0,25 s mamy $E(T)_{min}$= 58 godz. dla pierwszego okresu obserwacji i $E(T)_{min}$= 37 godz. dla drugiego okresu obserwacji. Oznacza to, że w drugim okresie obserwacji stan niezawodności pompy nr 3 znacznie się pogorszył. Stąd też widać, że obsługa w pierwszym okresie powinna być zaplanowana po 58 godz., a w drugim okresie już po 37 godz.

Z tab. 4.4 dla progu 0,25 s mamy $E(T)_{min}$= 88 godz. dla pierwszego okresu obserwacji i $E(T)_{min}$= 66 godz. dla drugiego okresu obserwacji. Oznacza to, że w drugim okresie obserwacji stan niezawodności pompy nr 4 nieznacznie się pogorszył. Stąd też widać, że obsługa w pierwszym okresie powinna być zaplanowana po 88 godz., a w drugim okresie już po 66 godz.

Z tab. 4.5 dla progu 0,25 s mamy $E(T)_{min}$= 95 godz. dla pierwszego okresu obserwacji i $E(T)_{min}$= 80 godz. dla drugiego okresu obserwacji. Oznacza to, że w drugim okresie obserwacji stan niezawodności pompy nr 3 nieznacznie się pogorszył. Stąd też widać, że obsługa w pierwszym okresie powinna być zaplanowana po 95 godz., a w drugim okresie już po 80 godz. Uwzględnienie warunków początkowych pozwala precyzyjnie określać parametry niezawodnościowe (mamy dłuższe czasy, zatem proces eksploatacji jest tańszy).

Z tab. 4.6 dla progu 0,25 s mamy $E(T)_{min}$= 88 godz. dla pierwszego okresu obserwacji i $E(T)_{min}$= 69 godz. dla drugiego okresu obserwacji. Oznacza to, że w drugim okresie obserwacji stan niezawodności pompy nr 4 się pogorszył. Stąd też widać, że obsługa w pierwszym okresie powinna być zaplanowana po 88 godz., a w drugim okresie już po 69 godz.

W przedstawionym przykładzie wykorzystano to, że $E(T) - \sigma_{E(T)} < E(T) + \sigma_{E(T)}$. Można wykorzystać dokładniejsze relacje między $E(T)_{min}$ i $E(T)_{max}$, które uwzględniają poziomy ufności (np. 95%). Wtedy $E(T) - 1{,}96\sigma_{E(T)}/\sqrt{n} < E(T) < E(T) + 1{,}96\sigma_{E(T)}/n$ [8].

4.4. Podsumowanie

Obecnie podstawą do obliczania charakterystyk i parametrów niezawodności każdego pojedynczego obiektu technicznego w procesie jego

użytkowania i obsługi są symptomy uszkodzeń katastroficznych, parametrycznych i chwilowych. Przeważnie charakterystyki niezawodności oblicza się na podstawie łatwych do identyfikacji uszkodzeń katastroficznych.

Takie podejście stosowane jest ze względu na duże trudności w procesie wyznaczania uszkodzeń parametrycznych i chwilowych $m_b(t)$ i $m_c(t)$, zatem i charakterystyki niezawodności $R_b(t)$ i $R_c(t)$.

Szczególnie potrzebną informacją będą wskaźniki niezawodności wyznaczone na podstawie stosunkowo niegroźnych uszkodzeń parametrycznych $m_b(t)$ i chwilowych $m_c(t)$: $R(t)=R_b(t)R_c(t)$, a stąd $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$. Wtedy zakłada się, że $R_a(t)=1$, co oznacza, że charakterystyka, co jest szczególnie istotne, zostaje wyznaczona przed pojawieniem się uszkodzenia katastroficznego. Charakterystyki zostają zatem wyznaczone tylko na podstawie uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, co jest bezpieczne dla eksploatowanego obiektu technicznego.

4.5. Spis literatury

1. Bojarski W.W.: *Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych*, PWN, Warszawa 1967.
2. Borowczyk H., Lindstedt P., Manerowski J.: *Premises for a practical computer-aided parametric method of evaluation of the technical object reliability*, "Journal of KONES", Vol. 16, no. 12/2009, PAN, Warszawa 2009.
3. Gniadek B.W.: *Metody matematyczne w teorii niezawodności obiektów technicznych*, PWN, Warszawa 1986.
4. Hebda M., Janicki D.: *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji*, WKiŁ, Warszawa 1977.
5. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., Żurek J.: *Wybrane rozkłady prawdopodobieństwa wykorzystywane w symulacyjnych badaniach bezpieczeństwa systemów transportowych*, ZEM PAN, zeszyt 2 (102), vol. 30, 1995.
6. Kopociński A.: *Zarys teorii odnowy i niezawodności*, PWN, Warszawa 1973.
7. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa 2002.
8. Miller J., Miller J.: *Statystyka i chemometria w chemii analitycznej*, Warszawa 2016.
9. Migalski J. (red.): *Inżynieria niezawodności*, Poradnik ZETOM, Warszawa 1992.
10. *Niezawodność w technice*. Zestaw norm, Wyd. Normalizacyjne ALFA – WERO, Warszawa 1997.

11. Sotskow B.S.: *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*, WNT, Warszawa 1973.
12. Sztarski M.: *Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych*, WKiŁ, Warszawa 1972.
13. Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J.: *Niezawodność systemów technicznych*, WNT, Warszawa 1990.
14. Woropay M.: *Diagnostyka i niezawodność systemów technicznych*, „Postępy cybernetyki", Ossolineum, zeszyt 2/1983.
15. Woropay M. (red.): *Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn*, ITE – ATR, Radom–Bydgoszcz 1996.
16. Żółtowski B, Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*, ATR, Bydgoszcz 1996.
17. Żółtowski B.: *Doskonalenie systemu eksploatacji maszyn*, WSOWRiA, Toruń 1986.
18. Żurek J., Krutkow A., Stawiński Ł.: *Symulacyjne badania algorytmu doboru modelu matematycznego rozkładu*, Materiały Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 1991.

PODSUMOWANIE MONOGRAFII

Badania niezawodności obiektów technicznych to problem ważny i ciągle aktualny. Dotyczy to w szczególności sytuacji, gdy ma się do czynienia z małymi zbiorami obiektów (dwa, trzy obiekty) lub pojedynczymi obiektami i małymi zbiorami uszkodzeń tych obiektów. W procesie badań niezawodności ważnym elementem staje się metoda identyfikacji uszkodzeń. Mapa uszkodzeń katastroficznych, parametrycznych i chwilowych jest podstawą do wyznaczania charakterystyk i parametrów niezawodnościowych i jest efektem przyjętej metody identyfikacji.

Aktualnie do wyznaczania charakterystyk i parametrów niezawodnościowych wykorzystywane są przede wszystkim uszkodzenia katastroficzne, które są niebezpieczne dla istnienia pojedynczego obiektu jako elementu danego zbioru obiektów. Słabo wykorzystywane są uszkodzenia parametryczne i chwilowe, które nie są tak bezwzględnie niebezpieczne dla istnienia obiektu. W praktyce niezawodności znany jest wzór na prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu (maszyny, urządzenia, systemu):

$$R(t)=R_a(t)R_b(t)R_c(t) \tag{1}$$

gdzie: $R_a(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia katastroficzne, $R_b(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia parametryczne, $R_c(t)$ – prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na uszkodzenia chwilowe.

Ze wzoru 1 wynika, że do określenia niezawodności (prawdopodobieństwa poprawnej pracy obiektu) wymagana jest liczba uszkodzeń katastroficznych $m_{Ra}(t)$, parametrycznych $m_{Rb}(t)$ i chwilowych $m_{Rc}(t)$, a stąd estymatory $R_a^*(t)$, $R_b^*(t)$, $R_c^*(t)$. Ponieważ praktycznie zawsze trudno jest wyznaczyć $m_{Rb}(R_b)$ i $m_{Rc}(R_c)$, to przeważnie wyznacza się charakterystyki niezawodnościowe tylko na podstawie liczby uszkodzeń katastroficznych $m_{Ra}(t)$, koniecznie odpowiednio licznego zbioru obiektów. Wadą tego sposobu obliczania charakterystyk niezawodnościowych

jest to, że bazuje on na zawsze niebezpiecznych uszkodzeniach katastroficznych (częściowo mogą być uwzględnione uszkodzenia parametryczne) oraz że może być zrealizowany najlepiej na dużym zbiorze obiektów. W takiej sytuacji wzór na niezawodność przyjmuje postać:

$$R(t) = R_a(t) \cdot 1 \cdot 1 \tag{2}$$

Praktyka eksploatacyjna stwarza przed obsługą techniczną coraz trudniejsze zadania. Wymaga się, żeby charakterystyki niezawodnościowe były wyznaczane najlepiej przed pojawieniem się niebezpiecznych uszkodzeń katastroficznych i dla małych zbiorów (pojedynczych) obiektów. Wtedy wzór na niezawodność przyjmuje postać:

$$R(t) = 1 \cdot R_b(t)R_c(t) \tag{3}$$

Realizacja tego zadania jest złożona. Wymaga bowiem przeprowadzenia identyfikacji uszkodzeń parametrycznych $m_{Rb}(t)$ i chwilowych $m_{Rc}(t)$, co, jak wcześniej powiedziano, jest trudne i było powodem, że dotychczas charakterystyki niezawodnościowe były wyznaczane tylko na podstawie uszkodzeń katastroficznych $m_{Rc}(t)$.

W monografii podano skuteczny sposób identyfikacji uszkodzeń parametrycznych $m_{Rb}(t)$ i chwilowych $m_{Rc}(t)$. Bazą tej identyfikacji jest fakt, że każdy obiekt w otoczeniu może być opisany za pomocą dwóch skorelowanych równań stanu:

$$\begin{aligned} \dot{D} &= a_{Rb}D + b_{R_D}U \\ \dot{U} &= a_{Rc}U + b_{R_U}D \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie: *D* – wektor sygnałów diagnostyki związanych ze stanem technicznym obiektu, *U* – wektor sygnałów automatyki (otoczenia), wynikający z działania obiektu, a_{Rb} – parametr stanu technicznego obiektu, a_{Rc} – parametr stanu działania obiektu w otoczeniu, b_{Rb} – parametr oddziaływania stanu działania na stan techniczny, b_{Rc} – parametr oddziaływania stanu technicznego na stan działania. Równania 4 wynikają z oczywistego spostrzeżenia, że wartość użytkowa obiektu *U* zależy od jego stanu zużycia *D*,

a wartość jego stanu technicznego (zużycia) *D* zależy od jego stanu użytkowania (otoczenia) *U*. Krótko mówiąc, stan *D* jest otoczeniem dla stanu *U*, a stan *U* jest otoczeniem dla stanu *D*.

W procesie identyfikacji uszkodzeń parametrycznych bada się przebieg (w dostatecznie długim czasie obserwacji wynikającym z ergodyczności strumienia uszkodzeń) parametru a_{Rb}, a w procesie identyfikacji uszkodzeń chwilowych parametru a_{Rc}. Odpowiednio duże zmiany parametru a_{Rb} uznaje się za uszkodzenia parametryczne, a odpowiednio duże chwilowe zmiany parametru a_{Rc} uznaje się za uszkodzenia chwilowe. Zakłada się, że istotna zmiana parametru a_{Rb} i a_{Rc} jest wtedy, gdy przekroczy on wartość progu diagnostycznego (statystycznego lub wynikającego z twierdzenia Lindeberga – Levy'ego). Efektem takiego podejścia jest mapa uszkodzeń parametrycznych i chwilowych, która może być (i jest) podstawą do wyznaczenia charakterystyk niezawodnościowych $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ oraz parametrów niezawodnościowych $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$. Pozwalają one ciągle obserwować właściwości niezawodnościowe różnych pojedynczych obiektów tego samego typu z danego dowolnego zbioru i danego pojedynczego obiektu w różnych dostatecznie długich okresach obserwacji.

Na uwagę zasługuje fakt, że badania niezawodnościowe obiektu bazujące na parametrach $E(T)$ i $\sigma_{E(T)}$ mogą być zrealizowane z wykorzystaniem tylko kartki papieru w kratkę formatu A4 i zwykłego kalkulatora. Ta prostota pozwala domniemywać, że przedstawiona w monografii metoda może być powszechnie stosowana w procesie obsługi obiektów technicznych.

INDEKS

A

analizatory · 49
analogi elektryczne · 49

B

badania eksploatacyjne · 68, 72
badania nieniszczące · 31
badanie diagnostyczne · 17
baza danych · 49
baza wiedzy · 49

C

charakterystyka progowa · 66, 67
charakterystyki dynamiczne · 48
charakterystyki niezawodności · 16, 63, 160, 163, 164
cybernetyczny system · 11
czas bergsonowski · 12
czas newtonowski · 12

D

destrukcja · 13
diagnostyka · 7, 14, 16, 39, 41, 46, 52, 53, 102, 145, 160
dozorowanie · 19
dystrybuanta rozkładu · 123

E

ergodyczność · 108, 144, 148, 165
estymatory · 107, 149, 163

F

formowanie sygnałów · 17
funkcja gęstości uszkodzeń · 144
funkcja intensywności uszkodzeń · 144
funkcja niezawodności · 144
funkcja wiodąca · 106
funkcja zawodności · 144
funkcji korelacji · 16, 17
funkcjonalna metoda diagnozowania · 4, 68

G

gęstość rozkładu · 123
graficzne metody wyznaczania rozkładów · 136

H

hipotetyczny rozkład · 136
histogram · 135, 136

I

identyfikacja uszkodzeń · 4, 58, 59, 61
informacja · 7, 13, 14, 49, 58
intensywność uszkodzeń · 108

K

kompleksowy sygnał · 71, 72
korektor · 47
korelatory · 49
kwantyl rzędu *p* · 107
kwartyle · 107

L

liczba uszkodzeń · 5, 63, 148, 163

Ł

łożyskowania zespołu pompowego · 5, 147

M

mapa uszkodzeń · 165
Maxwell · 14
mediana · 107
metody diagnozowania · 19
model diagnostyczny · 17, 20
moment zwyczajny · 106

N

niezawodność · 7, 28, 31, 54, 145, 146, 160, 161, 164

O

obiekt diagnozowania · 19, 20, 21
odchylenie standardowe · 63, 66, 82, 83, 84, 128, 148
okres obserwacji · 158
organoleptyczna kontrola · 34
osprzęt układu regulacji · 45

P

parametr stanu działania · 164
parametr stanu technicznego · 59, 61, 164
parametry niezawodności · 148, 159
podatność diagnostyczna · 27
potencjał eksploatacyjny · 21
progi diagnostyczne · 54, 103
prognozowanie · 20
prognozowanie stanu technicznego · 20
próg statystyczny · 63
punkty regulacyjne · 46

R

regulacja · 7, 20, 39, 52, 53, 102, 131
regulator · 42, 45
rozkład logarytmiczno–normalny · 130
rozkład normalny · 129
rozkład Weibulla · 128
rozkład wykładniczy · 135
równania interakcji · 59, 71
równania stanu · 60, 62, 164

S

stan techniczny · 8, 19, 59, 61, 62, 64, 164

standardowe odchylenie czasu zdatności · 107
stanowisko diagnostyczne · 29
sygnały diagnostyczne · 14, 51, 68
system obsługi · 13

T

test zgodności · 5, 135
twierdzenie Lindeberga – Levy'ego · 66, 89–100, 165

U

układ regulacji · 43
układ otwarty · 39, 40
układ zamknięty · 40
uszkodzenie · 7, 31, 51, 55–57, 61, 101, 105, 107, 108, 132

W

wariancja czasu zdatności · 106
wartości graniczne · 51, 110–122
wartość oczekiwana czasu zdatności · 106
wartość progowa · 66
wartość zadana · 42
wibroakustyczna metoda diagnozowania · 4, 69
wnioskowanie diagnostyczne · 16, 25
wrażliwość układu regulacji · 43

Z

zakłócenie · 40
zasady automatyki · 3, 7, 8, 13, 39, 41, 43–46
zespół pompowy · 67, 70, 72, 101